

**ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DEL IMPACTO DE LA RADIACIÓN DIFUSA EN LA  
GENERACIÓN ELÉCTRICA USANDO PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS POLICRISTALINOS**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Tesis previa a la obtención del título de: INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DEL IMPACTO DE LA RADIACIÓN DIFUSA EN  
LA GENERACIÓN ELÉCTRICA USANDO PANELES SOLARES  
FOTOVOLTAICOS POLICRISTALINOS**

**AUTOR:  
WILLIAM GABRIEL JACHO LOACHAMIN**

**DIRECTOR:  
ING. DIEGO CARRIÓN**

**Quito, diciembre del 2014**

## **DECLARATORIA DE AUTORÍA:**

Yo, William Gabriel Jacho Loachamin autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de grado y su reproducción sin fines de lucro.

A través de la presente declaración cedo el derecho de propiedad intelectual correspondiente de este trabajo a la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana según lo establecido por la ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Quito, 09 de diciembre del 2014

---

**William Gabriel Jacho Loachamin**  
**CC: 1722552724**

**AUTOR**

**CERTIFICA:**

Yo, Ing. Diego Francisco Carrión Galarza tutor, director de la tesis certificó haber dirigido y revisado prolijamente cada uno de los capítulos técnicos y financieros del informe de la monografía, así como el funcionamiento del “Análisis y modelamiento del impacto de la radiación difusa en la generación eléctrica usando paneles solares fotovoltaicos policristalinos” realizada por el Sr. William Gabriel Jacho Loachamin, previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico en la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Por cumplir los requisitos autoriza su presentación.

Quito, 09 de diciembre del 2014

---

**Ing. Diego Francisco Carrión Galarza**  
**DIRECTOR**

## **DEDICATORIA.**

*William Gabriel Jacho Loachamin.*

*Este proyecto es dedicado con mucho amor,  
a mi padre Carlos Jose Jacho Tipan y mi madre Maria Elvia Loachamin Caiza,  
por enseñarme el valor de luchar por los sueños con mucho esfuerzo y dedicación,  
por estar siempre para mí en las buenas y las malas,  
por ese ejemplo de constancia y empeño.*

*A mis hermanos,  
por darme ese impulso y ese cariño durante toda mi carrera, por los consejos y  
enseñanzas que aprendo día a día.*

*A mis compañeros de clase  
quienes fueron un apoyo y una alegría en el proceso de estudios en la universidad.*

## **AGRADECIMIENTO.**

*William Gabriel Jacho Loachamin.*

*Principalmente agradezco a mi tutor Ing. Diego Carrión por brindarme sus conocimientos en el desarrollo del proyecto de tesis.*

*Agradezco a la prestigiosa Universidad Politécnica Salesiana por darme la oportunidad de prepararme de forma profesional y personal.*

*En general agradezco a todas las personas que hicieron posible la presente tesis, con su tiempo, colaboración y ánimos.*

## ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA:.....	ii
CERTIFICA: .....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xiii
GLOSARIO DE TÉRMINOS .....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	3
ENERGÍA SOLAR.....	3
1.1    Recurso Solar .....	3
1.1.1    Radiación solar .....	4
1.1.2    Tipos de radiación .....	5
1.1.2.1    Radiación solar directa .....	5
1.1.2.2    Radiación solar difusa .....	6
1.1.2.3    Radiación solar albedo .....	7
1.1.3    Irradiancia e insolación .....	8
1.1.4    Medición de la energía solar .....	8
1.1.4.1    Piranómetro .....	8
1.1.4.2    Pirheliómetro.....	9
1.1.4.3    Heliógrafo.....	10
1.2    Modelos Matemáticos Para el Análisis del Recurso Solar.....	11
1.2.1    Radiación solar extraterrestre .....	11
1.2.2    Radiación solar terrestre .....	12
1.2.2.1    Radiación solar sobre un plano horizontal .....	12
1.2.2.2    Radiación solar sobre un plano inclinado .....	15
1.3    Formas de Aprovechar el Recurso Solar.....	17
1.3.1    Aprovechamiento pasivo del recurso solar .....	17
1.3.2    Aprovechamiento pasivo del recurso solar .....	18
1.3.2.1    Conversión térmica .....	18



1.3.2.2	Conversión Fotovoltaica .....	20
1.3.3	Ventajas al aprovechar el recurso solar .....	21
1.4	Aplicaciones .....	22
1.4.1	Energía solar por refrigeración .....	22
1.4.1.1	Refrigeración por absorción amoníaco-agua .....	22
1.4.1.2	Refrigeración por absorción bromuro de litio-agua .....	23
1.4.2	Aplicación en el secado de productos agrícolas .....	24
1.4.3	Aplicación en la destilación de agua .....	26
CAPÍTULO II.....		27
PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS .....		27
2.1	Principio de Funcionamiento.....	27
2.1.1	Componentes de un sistema solar fotovoltaico .....	29
2.1.1.1	Panel solar en un sistema solar fotovoltaico .....	29
2.1.1.2	Baterías o Acumuladores en un sistema solar fotovoltaico.....	32
2.1.1.3	Reguladores en un sistema solar fotovoltaico .....	34
2.1.1.4	Inversores en un sistema solar fotovoltaico .....	35
2.1.2	Características de los paneles solares .....	36
2.1.3	Curva V-I.....	37
2.1.3.1	Curva V-I en función de la irradiancia.....	38
2.1.3.2	Curva V-I en función a la temperatura.....	38
2.2	Clasificación .....	39
2.2.1	Células de silicio monocristalino. ....	39
2.2.2	Células de silicio policristalino. ....	41
2.2.3	Células de láminas delgadas.....	42
2.2.3.1	Células de silicio amorfo.....	42
2.2.3.2	Celdas de arseniuro de galio.....	43
2.2.3.3	Células de telurio de cadmio / sulfuro de cadmio. ....	44
2.3	Eficiencia de los Paneles Solares .....	44
2.3.1	Eficiencia de las células solares .....	44
2.3.2	Eficiencia por la posición de los paneles solares .....	45
2.3.3	Eficiencia por la temperatura de los paneles solares .....	46
2.4	Impacto Ambiental .....	47
2.4.1	Impacto ambiental de la energía solar fotovoltaica.....	47
2.4.1.1	Contaminación .....	47

2.4.1.2	Utilización de terreno .....	48
2.4.1.3	Impacto Visual .....	48
2.4.1.4	Impacto sobre la flora y fauna .....	49
CAPÍTULO III .....		50
ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN DIFUSA .....		50
3.1	Factores Naturales que Inciden en un Panel Solar .....	50
3.1.1	Contaminación ambiental .....	51
3.1.1.1	Mantenimiento de los Paneles .....	51
3.1.2	Condiciones climáticas .....	51
3.1.3	Posición del sol .....	52
3.1.4	Generación de sombras .....	53
3.2	Medición del recurso solar .....	53
3.2.1	Medición por el método voltímetro - amperímetro .....	53
3.3	Análisis del comportamiento del panel solar fotovoltaico policristalino .....	57
3.3.1	Comportamiento en un día despejado .....	57
3.3.2	Comportamiento en un día nublado .....	59
3.4	Modelación Matemática .....	60
3.4.1	Modelización del promedio diario mensual de la radiación difusa .....	60
3.4.2	Modelización de la radiación difusa en el plano horizontal a lo largo de días claros.. .....	65
3.4.3	Modelización de la radiación difusa en el plano horizontal a lo largo de día .....	69
CAPÍTULO IV .....		75
ANÁLISIS DEL MODELO MATEMÁTICO .....		75
4.1	Verificación del Recurso Solar .....	75
4.1.1	Datos de la NASA para la radiación difusa en promedios mensuales en un plano horizontal. ....	76
4.1.2	Datos del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables en promedios horarios para la radiación difusa en un plano horizontal .....	78
4.2	Comprobación del Modelo Matemático .....	79
4.2.1	Comprobación para el modelo promedio diario mensual de la radiación difusa en un plano horizontal .....	79
4.2.2	Comprobación para el modelo horario de la radiación difusa .....	82
4.3	Análisis de Eficiencia .....	88
4.3.1	Análisis de eficiencia para el modelo matemático para los promedios mensuales de la radiación difusa .....	88

4.3.2	Análisis de eficiencia para el modelo matemático horario de la radiación difusa .....	88
4.4	Interpretación de Resultados .....	90
	CONCLUSIONES .....	91
	RECOMENDACIONES .....	93
	REFERENCIAS .....	94
	ANEXOS .....	98
	Anexo 1 .....	99
	Anexo 2 .....	102
	Anexo 3 .....	105
	Anexo 4 .....	108
	Anexo 5 .....	109
	Anexo 6 .....	110
	Anexo 7 .....	112
	Anexo 8 .....	114

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Radiación solar directa .....	6
Figura 1.2. Radiación solar difusa .....	6
Figura 1.3. Radiación solar albedo o reflejada .....	7
Figura 1.4. Piranómetro .....	9
Figura 1.5. Pirheliómetro.....	9
Figura 1.6. Heliógrafo. ....	10
Figura 1.7. Espectro de la radiación solar extraterrestre a nivel del mar. ....	12
Figura 1.8. Relación entre la posición del sol en el cielo y las cordenas sobre la tierra .....	14
Figura 1.9. Estructura de una central eléctrica termosolar .....	18
Figura 1.10. Tecnologías termosolares para la generación de electricidad .....	20
Figura 1.11. Instalación solar fotovoltaica .....	21
Figura 1.12. Máquina de refrigeración por absorción amoníaco-agua.....	23
Figura 1.13. Máquina de refrigeración por absorción bromuro de litio-agua. ....	24
Figura 1.14. Colector solar térmico para obtener aire caliente.....	25
Figura 1.15. Modelo de destilador solar de agua.....	26
Figura 2.1. Diagrama de una fotocelda de silicio cristalino. ....	28
Figura 2.2. Elementos de los paneles solares .....	30
Figura 2.3. Vista frontal de los elementos de los paneles solares. ....	30
Figura 2.4. Tipos de baterías solares plomo-ácido .....	33
Figura 2.5. Reguladores o controladores de carga.....	34
Figura 2.6. Inversores .....	35
Figura 2.7. Curva característica V-I .....	37
Figura 2.8. Curva V-I en función de la irradiancia.....	38
Figura 2.9. Curva V-I en función de la temperatura.....	39
Figura 2.10. Módulo formado por células de silicio monocristalino.....	40
Figura 2.11. Módulo formado por células de silicio policristalino. ....	41
Figura 2.12. Módulo formado por células de silicio amorfo. ....	43
Figura 2.13. Orientación de una estructura fija para maximizar la captación de radiación solar a lo largo del año .....	45
Figura 3.1. Movimiento aparente del sol según la época del año.....	52
Figura 3.2 DAQ NI USB 6212 .....	54
Figura 3.3. Proceso de la medición del recurso solar .....	55

Figura 3.4. Panel solar instalado en la Universidad Politécnica Salesiana.....	55
Figura 3.5. Programación en Labview para el registro de voltaje en un archivo TXT y EXCEL. ....	56
Figura 3.6. Curva de la irradiancia medido en un día despejado.....	57
Figura 3.7. Curva de la irradiancia medido en un día despejado con pequeñas variaciones.....	58
Figura 3.8. Curva de la irradiancia medido en un día nublado.....	59
Figura 3.9. GPS utilizado para medir la longitud, latitud y altura.....	62
Figura 3.10. Curva de la radiación extraterrestre vs la radiación global a lo largo del año. ....	63
Figura 3.11. Curva de la radiación difusa diaria mensual para los días del año.....	64
Figura 3.12. Curva de la ecuación del tiempo a lo largo del año. ....	66
Figura 3.13. Curva de la irradiancia directa, difusa y global horaria para las horas del día. ....	69
Figura 3.14. Curva de la irradiancia directa, difusa y global horaria para las horas del día para el modelo matemático.....	74
Figura 4.1. Curva de la irradiancia medido el 12 de marzo del 2014.....	76
Figura 4.2. Página de la NASA .....	77
Figura 4.3. CM 12B/C Shadow Ring .....	79
Figura 4.4. Curva de la radiación solar difusa de valores promedio mensual.....	80
Figura 4.5. Curva de la radiación difusa diaria mensual para los días del año.....	82
Figura 4.6. Curva horaria de la irradiancia difusa tomada para el 15 de mayo del INER.....	84
Figura 4.7. Mapa de la ESPOCH.....	84
Figura 4.8. Irradiancia solar difusa horaria para el 15 de mayo .....	86
Figura 4.9. Irradiancia solar global y directa horaria para el 15 de mayo .....	86

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Día tipo recomendado para valores de declinación por meses y días del año (n).....	13
Tabla 2.1. Eficiencia de diferentes tipos de células solares.....	44
Tabla 3.1. Características del panel solar fotovoltaico .....	53
Tabla 3.2. Valores de visibilidad para distintas condiciones atmosféricas . .....	71
Tabla 4.1. Promedios mensuales de la radiación directa y difusa según la página de la NASA .....	80
Tabla 4.2. Promedios mensuales de la radiación difusa según el modelo matemático y el error absoluto comparado con los promedios mensuales de la NASA.....	81
Tabla 4.3. Promedios horarios de la radiación difusa y global del INER.. .....	83
Tabla 4.4. Valores de la radiación solar difusa calculados vs medidos .....	87
Tabla 4.5. Error relativo de los valores calculados en base a los medidos.....	89

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Datos de irradiancia, de la medición realizada mediante el método voltímetro – amperímetro tomados el día 12 de marzo del 2014.....	99
Anexo 2. Datos de irradiancia, de la medición realizada mediante el método voltímetro – amperímetro tomados el día 16 de febrero del 2014. ....	102
Anexo 3. Datos de irradiancia, de la medición realizada mediante el método voltímetro – amperímetro tomados el día 09 de marzo del 2014.....	105
Anexo 4. Scrip con el cual se calculó la radiación solar extraterrestre y la radiación solar global para todos los días del año. ....	108
Anexo 5. Scrip con el cual se calculó la radiación solar difusa en un plano horizontal para promedios diarios mensuales en función del índice de claridad para todos los días del año.....	109
Anexo 6. Scrip con el cual se calculó la irradiancia solar horaria directa, difusa y global em el plano horizontal para días claros. ....	110
Anexo 7. Scrip con el cual se calculó la irradiancia solar horaria directa, difusa y global en el plano horizontal a lo largo del día, para un valor de visibilidad de 10Km. ....	112
Anexo 8. Scrip con el cual se calculó la irradiancia solar horaria directa, difusa y global en el plano horizontal a lo largo del día, para el 15 de mayo del 2014, para la localidad de la ESPOCH, con un valor de visibilidad variable.....	114

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

$\Delta E$	Energía producida.
$\Delta m$	Pérdida de masa en kg.
C	Velocidad de la luz en el vacío ( $3 * 10^8 \text{ m/s}$ ).
E	Energía de los fotones.
h	Constante de Planck, que equivale a $6,625 * 10^{-34} \text{ Js}$ .
Js	Joules.
v	Frecuencia a la que oscilan los fotones o la frecuencia de las ondas de luz.
w	Vatios.
Kwh	Kilovatios hora.
m <sup>2</sup>	Metros cuadrados.
Km	Kilómetros.
V	Voltios.
I	Corriente.
°K	Grados Kelvin.
mA	Miliamperios.
cm <sup>2</sup>	Centímetros cuadrados.
°C	Grados Celsius.
Cd	Cadmio.
Se	Selenio.
Pmax	Potencia máxima.
Vpmax	Voltaje pico máxima.
mm	Milímetros.
Ipmax	Corriente pico máxima.
Isc	Corriente de cortocircuito.
Vdc	Voltaje de corriente continua.
mbar	Milibar
mr	Masa óptica del aire relativo.
ma	Masa de aire a la presión actual.
Tr	Transmitancia por dispersión de Rayleigh.
To	Transmitancia de la radiación debido a la absorción por el ozono.



Tg	Transmitancia debido a la absorción por gases uniformemente mezclados.
Tw	Transmitancia debido a la absorción por vapor de agua.
Ta	Transmitancia de radiación debida a la atenuación por los aerosoles.
Taa	Transmitancia de la radiación debida a la absorbancia del aerosol.
In	Irradiancia solar directa horaria.
Tas	Transmitancia debido a la dispersión de aerosoles.
Idr	Irradiancia difusa por dispersión de Rayleigh.
Ida	Irradiancia difusa por dispersión de aerosoles.
Idm	Irradiancia difusa luego de las múltiples reflexiones entre la tierra y su atmósfera.
Id	Irradiancia solar difusa horaria.
DAQ	Adquisición de Datos.
EVA	Etileno Vinil Acetato.
INER	Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables.
UTC	Tiempo Universal Coordinado.
ESPOCH	Escuela Superior Politécnica del Chimborazo.
TVS	Tiempo Solar Verdadero.
Vis	Visibilidad.

# Resumen

## ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DEL IMPACTO DE LA RADIACIÓN DIFUSA EN LA GENERACIÓN ELÉCTRICA USANDO PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

William, Gabriel, Jacho, Loachamin

willigabo080488@outlook.com

Universidad Politécnica Salesiana

*Resumen*—“La estimación de la radiación solar nos permite pronosticar la producción energética, es por tal razón que hay varios estudios realizados para diferentes localidades, estimando la radiación solar directa y la radiación solar difusa, el estudio realizado busca la estimación horaria de la irradiancia solar difusa y la estimación promedio diaria mensual de la radiación solar difusa, conociendo que la radiación solar difusa es la que se dispersa en la atmósfera, es por tal razón la importancia de estimar la misma, ya que nos permite tener un panorama más amplio de la componente de la radiación solar que se comporta como pérdida y afecta directamente a la generación eléctrica mediante paneles solares, la cual depende de las condiciones atmosféricas.

Los modelos matemáticos, para la estimación de la radiación solar difusa en promedios diarios mensual y la estimación de la irradiancia solar difusa horaria, se basa en varias expresiones, ecuaciones que describen la transferencia radiactiva de las componentes de la radiación solar directa y difusa, al igual que la ecuación de la posición angular del sol en el cielo (cenital) y las ecuaciones para encontrar el tiempo solar verdadero”.

*Palabras Claves* - Estimación de la radiación solar difusa en promedio diario mensual y promedio horario.

# Abstract

## ANALYSIS AND MODELING OF THE IMPACT OF DIFFUSE RADIATION TO GENERATE ELECTRICITY USING PHOTOVOLTAIC SOLAR PANELS

William, Gabriel, Jacho, Loachamin  
willigabo080488@outlook.com  
Universidad Politécnica Salesiana

*Summary*—“ Estimation of solar radiation allows us to predict the energy production is for this reason that there are several studies for different locations, estimating the direct solar radiation and diffuse solar radiation, the study seeks to estimate the hourly diffuse solar irradiance and estimate the monthly average daily diffuse solar radiation, knowing that the diffuse solar radiation that is scattered in the atmosphere, it is for this reason the importance of estimating the same, allowing us to have a broader picture of the component solar radiation behaves as loss and directly affects power generation using solar panels, which depends on the atmospheric conditions.

Mathematical models for estimating the diffuse solar radiation in monthly daily averages and estimating diffuse solar irradiance hourly, is based on several expressions, equations describing the transfer of the radioactive components of the direct and diffuse solar radiation, as equations of the angular position of the sun in the sky (zenith) and the equations to find the true solar time”.

*Keywords* – Estimation of average hourly diffuse solar radiation at daily and monthly average.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad el aprovechamiento de la energía solar es una de las soluciones a la generación de energía eléctrica, esto por aumento de la demanda y el impacto ambiental que generan las energías convencionales con la dependencia de combustibles, es por esta razón que la energía solar surge como alternativa. La generación de energía eléctrica por los paneles solares fotovoltaicos es uno de los métodos más utilizados, siendo una energía que no produce un alto impacto en el medio ambiente [1].

El sol es una fuente poderosa de energía, es por tal razón que si se pudiera aprovechar la energía que emite el sol, con media hora de un día bastaría para satisfacer la demanda energética mundial, pero es imposible de realizar en forma práctica [2]. Pero la generación de energía eléctrica por paneles solar fotovoltaicos presenta desventajas como su alto costo, al igual que su generación depende de las condiciones atmosféricas.

La generación de energía eléctrica por paneles solar fotovoltaica es influenciada por las condiciones atmosféricas, ya que en un día nublado la radiación es prácticamente dispersada en su totalidad, mientras que en un día con clima seco, los paneles captan mayor radiación esto al no sufrir cambios en su dirección. Este efecto genera un problema en la generación eléctrica por paneles solares fotovoltaicos, disminuyendo su capacidad de generación, es decir, que en la radiación solar, las nubes absorben parte de la energía incidente [2].

Es por tal razón que se han realizado varias investigaciones para la estimación de la radiación solar directa y la radiación solar difusa. Debido a esto surge la necesidad de buscar nuevos métodos que permitan obtener estimaciones de la radiación solar difusa en promedios mensuales diarios y promedios horarios.

En la presente tesis se abordó un estudio y análisis de la estimación de la radiación solar difusa en promedios horarios y mensuales, la cual se base en un modelo matemático, se la comparó con fuentes de investigación como la NASA para promedios mensuales y las del INER (Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables), para promedios horarios. También es importante la medición del recurso solar, por tal razón se realizó la medición en base al método voltímetro – amperímetro, que mide la radiación solar incidente en un panel solar.

# **CAPÍTULO I**

## **ENERGÍA SOLAR**

Para el presente estudio la energía solar es nuestro punto de partida, sabiendo que la energía solar es el aprovechamiento de la radiación del sol y que la radiación solar es el flujo de energía que recibimos del sol, siendo el sol una fuente poderosa de energía se puede decir que el objetivo del aprovechamiento de la energía solar es el amortiguar el impacto ambiental; este recurso en nuestro país no es muy explotado debido a su alto costo de instalación y el poco estudio de su tecnología, la energía solar puede tener varias aplicaciones desde satisfacer varias necesidades como el obtener agua caliente para diferentes aplicaciones, o ser aplicada para la agricultura, entre otras. También la energía solar se la puede aplicar para la generación de electricidad utilizando paneles solares que constan de un conjunto de celdas solares.

### **1.1 Recurso Solar**

El sol es un una fuente de energía que emite luz y calor, este recurso es una solución para el problema energético que tenemos en la actualidad, este problema es debido a que la demanda va en aumento, y al impacto ambiental que generan las energías convencionales a diferencia de las energía renovables. Uno de los métodos más utilizados para convertir energía solar en energía eléctrica es la generación de energía eléctrica por los paneles solares fotovoltaicos, siendo una energía que no produce un alto impacto en el medio ambiente [1].

El estudio del recurso solar es importante por la necesidad de la energía eléctrica, sabiendo que la demanda masiva de energía nos lleva a buscar energías alternativas renovables. La energía solar representa el mejor modelo de fuente renovable, sin embargo al tomarse directamente de la radiación solar, el aprovechamiento energético no alcanza rendimientos equiparables a los de otras fuentes. La energía solar, como recurso energético terrestre, está constituida simplemente por la porción de la luz que emite el Sol y que es interceptada por la Tierra.

El sol es una estrella de nuestra galaxia, que tiene forma esférica con un radio de unos 700,000km, su composición es de 75% de hidrógeno y 24% de helio. El núcleo es la fuente de la energía solar, las condiciones de presión y temperatura hacen posible lo que conocemos como fusión nuclear. Al fusionar cuatro núcleos de hidrógeno producen uno de helio, con una pérdida de energía de acuerdo con la ecuación de la (1.1), de Albert Einstein [2]:

$$\Delta E = \Delta m * C^2 \quad (1.1)$$

Dónde:

$\Delta E$ : energía producida

$\Delta m$ : pérdida de masa en kg

C: velocidad de la luz en el vacío ( $3 * 10^8 \text{ m/s}$ )

La reacción se produce con una baja probabilidad, deduciendo que cada kg de hidrógeno consumido producido, produce  $5,2 * 10^{13} \text{ Kg} * \text{m}^2 / \text{s}^2$ , es decir que la energía del núcleo se emite en forma de radiación [2].

### 1.1.1 Radiación solar

El Sol se encuentra a una temperatura media de 5.500 °C, teniendo unas reacciones en su interior que producen pérdidas de masa que se transforman en energía, las cuales se transmiten a su exterior, conocidas como radiación solar. La radiación en el Sol es de 63.450.720W/m<sup>2</sup>, sabiendo que el sol emite en todas las direcciones y que el radio de distancia es de 149,6 millones de Km, se puede determinar cuál es la radiación en ese punto. La constante solar es el valor de la radiación solar que se recibe fuera de la atmósfera sobre una superficie perpendicular a los rayos solares su valor es 1.353 W/m<sup>2</sup>, que varía durante el año en un  $\pm 3\%$  [3].

La radiación solar es el flujo de energía que recibimos del sol, la energía contenida en los rayos del sol se calcula a partir de la ecuación (1.2) de Planck,

$$E = h * v \quad (1.2)$$

Dónde:

E: energía de los fotones.

h: constante de Planck, que equivale a  $6,625 * 10^{-34}$  Js.

v: frecuencia a la que oscilan los fotones o la frecuencia de las ondas de luz.

De la ecuación (1.2) se puede decir que hay fotones que poseen gran cantidad de energía como los rayos gamma y otros menos energéticos como los rayos infrarrojos, esto nos dice que hay fotones que ni siquiera atraviesan la atmósfera terrestre. Un cálculo teórico basados en la ley de Planck nos permitiría decir que el flujo total emitido por el sol en todo el rango de frecuencia equivale a  $3,8 * 10^{23}$  Kw y solo una pequeña parte de esta llega hasta nuestro planeta [4].

Sabiendo que el sol es una fuente poderosa de energía se puede decir que el objetivo del aprovechamiento de la energía solar, por un lado es la de ahorrar en energía no renovable sobre todo la energía fósil y nuclear, y amortiguar el impacto ambiental. Para aprovechar esta energía, debemos conocer bien, algunas de sus características más importantes como lo son: horas de sol para una situación geográfica determinada, trayectoria aparente del sol, cantidad recibida de energía por metro cuadrado y unidad de tiempo [1].

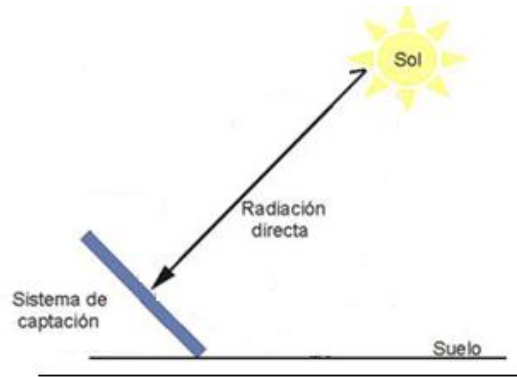
### **1.1.2 Tipos de radiación**

El tipo de radiación se clasifica según como llegue la luz solar a la superficie de la tierra, pueden ser en tres tipos diferentes: directa, dispersa o difusa y albedo.

#### **1.1.2.1 Radiación solar directa**

La radiación solar directa es la que llega directamente del sol, es una radiación que tiene una dirección bien definida, es decir que viaja en línea recta así el sistema de captación, esta puede reflejarse y concentrarse para su utilización, como lo veremos en la Figura 1.1 [4].



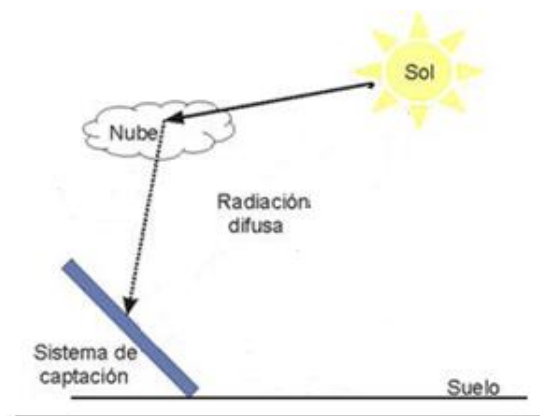


**Figura 1.1.** Radiación Solar Directa.

**Fuente:** J. C. Y. y. J. M. Lopez, «T E S I S - Instituto Politécnico Nacional,» 2009. [En línea]. Available: <http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/5641/1/ESTUDIOELECTRIFICAC.pdf>. [Último acceso: 01 04 2013].

### 1.1.2.2 Radiación solar difusa

La radiación solar difusa es aquella que son interceptados partículas y moléculas contenidas en el aire, se dispersan en la atmósfera, esta radiación proviene de las nubes, esta no es direccional y su distribución es uniforme, como en la Figura 1.2. Es decir, que los gases y partículas desvían la radiación o lo dispersan. La radiación solar difusa genera un problema en la generación eléctrica por paneles solares fotovoltaicos, disminuyendo su capacidad de generación, es decir, que en la radiación solar, las nubes absorben toda la energía incidente y la vuelven a emitir [6].



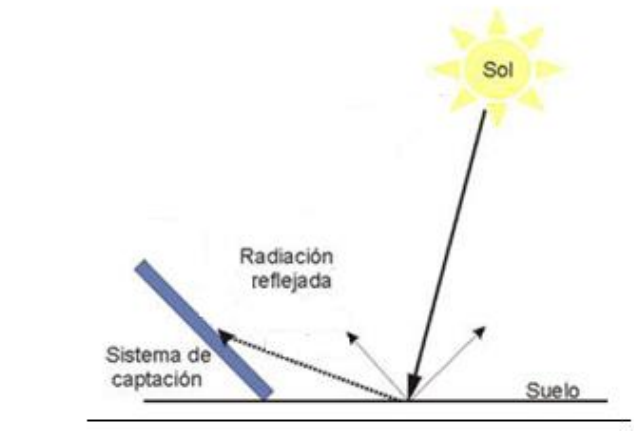
**Figura 1.2.** Radiación Solar Difusa.

**Fuente:** J. C. Y. y. J. M. Lopez, «T E S I S - Instituto Politécnico Nacional,» 2009. [En línea]. Available: <http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/5641/1/ESTUDIOELECTRIFICAC.pdf>. [Último acceso: 01 04 2013].

### 1.1.2.3 Radiación solar albedo

*“Se llama albedo a la fracción de la radiación reflejada por la superficie de la tierra o cualquier otra superficie. El albedo es variable de un lugar a otro y de un instante a otro, por ejemplo, para un cuerpo negro, su valor es igual a cero, pero para la nieve es de 0,9; para un suelo mojado es 0,18; etc.”<sup>1</sup>.*

De lo anteriormente expuesto la radiación solar albedo, es la radiación que llega a la superficie una vez reflejado en la superficie del entorno, esta no es claramente direccionada como nos muestra la figura 1.3. Además de los tipos de radiaciones anteriormente expuestos, tenemos la radiación global que es la suma de la radiación directa y la radiación difusa anteriormente visto, y la radiación total que es la suma de la radiación directa, de la radiación difusa y la radiación de albedo [4].



**Figura 1.3. Radiación Solar Albedo o Reflejada.**

**Fuente:** J. C. Y. y. J. M. Lopez, «T E S I S - Instituto Politécnico Nacional,» 2009. [En línea]. Available: <http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/5641/1/ESTUDIOELECTRIFICAC.pdf>. [Último acceso: 01 04 2013].

<sup>1</sup> M. A. Sanchez, Energía Solar Fotovoltaica, G. Noriega, Ed., Mexico D.F.: LIMUSA, 2011, p. 19.

### **1.1.3 Irradiancia e insolación**

Para entender el funcionamiento y rendimiento de los paneles solares es necesario tomar en cuenta conceptos de la energía solar como lo son: la irradiancia e insolación.

La irradiancia es la intensidad de luz solar, por tanto se recibe más irradiancia cuando no hay obstáculos como las nubes y está directamente orientada al sol. Su unidad es el watts por metro cuadrado ( $\text{W/m}^2$ ). La irradiancia en un día despejado alcanza un máximo al medio día de 1 a  $1.2 \text{ Kw/m}^2$  [7].

La insolación es la cantidad de energía solar recibida durante un intervalo de tiempo, este parámetro es importante para dimensionar el sistema fotovoltaico, ya que se necesita la insolación diaria promedio. Sus unidades son los kilowatts hora sobre metros cuadrados ( $\text{Kw.h/m}^2$ ) [7].

### **1.1.4 Medición de la energía solar**

Los instrumentos de medición de la radiación solar más utilizados, dependiendo de su funcionamiento y aplicación como: Piranómetro, Pirheliómetro y Heliógrafo.

#### **1.1.4.1 Piranómetro**

También llamado solarímetro, este instrumento es un medidor de radiación total; se expone a la radiación solar una lámina metálica con una superficie reflectante y junto otra cuya superficie es absorbente, esta será más caliente que la reflectante y, admitiendo que la diferencia de temperatura es proporcional a la radiación recibida, midiendo este salto térmico sabremos la radiación, para medir esta diferencia de temperatura se utilizará un termopar. Un piranómetro consta de un sensor análogo y colocado una cubierta semiesférica, de cristal de cuarzo, debe ser transparente para cualquier longitud de onda, como lo veremos a continuación en la Figura 1.4 [8].



**Figura 1.4.** Piranómetro.

**Fuente:** «SENSOVANT,» [En línea]. Available: <http://sensovant.com/productos/meteorologia/radiacion-solar/articulo/piranometro-portatil-precio-venta-economico-LP02.html>. [Último acceso: 26 11 2014].

#### 1.1.4.2 Pirheliómetro

También llamado actinómetro, este instrumento mide la radiación solar directa, en esencia es un piranómetro que se ha situado en el fondo de un tubo, este tubo está recubierto interiormente con pintura absorbente, al fin de reducir al mínimo cualquier reflexión, siendo estrecho y largo como para que desde el fondo se vea el sol como lo veremos en la Figura 1.5. Este instrumento da medidas correctas cuando está enfocado directamente al sol [8].



**Figura 1.5.** Pirheliómetro.

**Fuente:** «Paloma,» [En línea]. Available: <http://palomi28.blogspot.com/2010/10/el-pirheliometro.html>. [Último acceso: 11 08 2013]

### 1.1.4.3 Heliógrafo

Este instrumento se usa para medir la insolación, siendo el número de horas en las que el sol está brillante en el día, este instrumento mide la insolación que se halla concentrando en los rayos solares, en las ranuras del lado interior de un casquete se introduce al día una tira de cartulina, el sol quema en la tira huellas más o menos fuertes, según la intensidad de sus rayos. Una vez retirado la tira de cartulina, podemos saber durante qué horas de cada día ha habido sol. Se utiliza como focalizador una esfera de cristal pulimentada de acuerdo a una calibración como en la Figura 1.6, de forma que no es necesario mover este foco constantemente debido al movimiento aparente del sol a lo largo del día [8].



**Figura 1.6.** *Heliógrafo.*

**Fuente:** «Guías Prácticas.com,» [En línea]. Available: <http://www.guiaspracticas.com/estaciones-meteorologicas/heliografo>. [Último acceso: 26 11 2014].

## 1.2 Modelos Matemáticos Para el Análisis del Recurso Solar

### 1.2.1 Radiación solar extraterrestre

La constante solar ( $G_{sc}$ ) es la irradiancia recibida por una superficie perpendicular a los rayos del sol a la distancia media sol-tierra y fuera de la atmósfera, sabiendo que la irradiancia es la energía radiante por unidad de tiempo que incide sobre una superficie. El valor de la constante solar se ha determinado de datos experimentales obtenidos de satélites como lo es (1.3) [1]:

$$G_{sc} = 1353 \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (1.3)$$

Se determina que la radiación solar extraterrestre incidente, analíticamente se la expresa mediante la ecuación (1.4):

$$G = G_{sc} * \left( \frac{r_i}{r_0} \right)^2 \quad (1.4)$$

$$r^2 = \left( \frac{r_i}{r_0} \right)^2 = \left[ 1 + 0,033 \cos\left(2\pi * \frac{z}{365}\right) \right]^2 \quad (1.5)$$

Dónde:

$G_{sc}$ : constante solar.

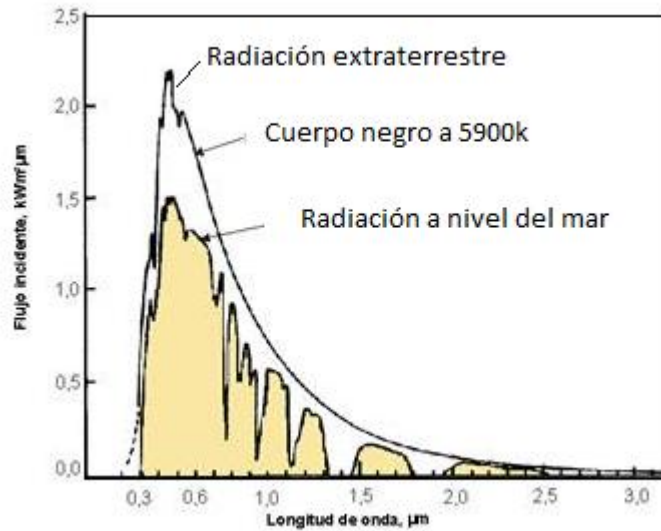
$r_i$ : es la distancia Sol – Tierra para un día determinado.

$r_0$ : es la distancia media Sol - Tierra. (Donde  $1AU = 149,46 \times 10^2 \text{ Km}$ )

$r^2$ : factor de corrección

$z$ : número del día del año (para el 1 de enero  $z = 1$  y para el 31 de diciembre,  $z = 365$ ).

En la figura 1.7 se presenta el espectro de la radiación solar extraterrestre, correspondiente a un cuerpo negro a la temperatura  $5777 \text{ }^\circ\text{K}$  y el espectro medio de la radiación a nivel del mar bajo la atmósfera [1].



**Figura 1.7.** Espectro de la radiación solar extraterrestre a nivel del mar.

**Fuente:** L. Jutglar, *Energía Solar*, Ediciones Ceac ed., vol. 1, Barcelona : Aleph, 2004, p. 265.

## 1.2.2 Radiación solar terrestre

Una vez que la radiación solar penetra la atmósfera, esta radiación es absorbida o dispersada que dependen de factores como el espesor la masa y la densidad de la capa de aire a la que atraviesa [1].

### 1.2.2.1 Radiación solar sobre un plano horizontal

Para el cálculo de la radiación solar sobre un plano horizontal es necesario el ángulo conformado entre el radio vector tierra-sol y el plano ecuatorial es la declinación solar de la ecuación (1.6), varía entre el ángulo -23,5 y 23,5 [12].

$$\delta = 23,45 * \sin\left[\frac{360}{365}(z + 284)\right] \quad (1.6)$$

Dónde:

$\delta$ : declinación solar.

Otra ecuación más aproximada que la anterior propuesta por Cooper, es la propuesta por Lokmanhekin que es la ecuación (1.7) [1].

$$\delta = 0,302 - 22,93\cos x - 0,229\cos 2x - 0,243\cos 3x + 3,851\sin x + 0,002\sin 2x - 0,055\sin 3x \quad (1.7)$$

Dónde:

$$x = \frac{2\pi z}{365} \quad (1.8)$$

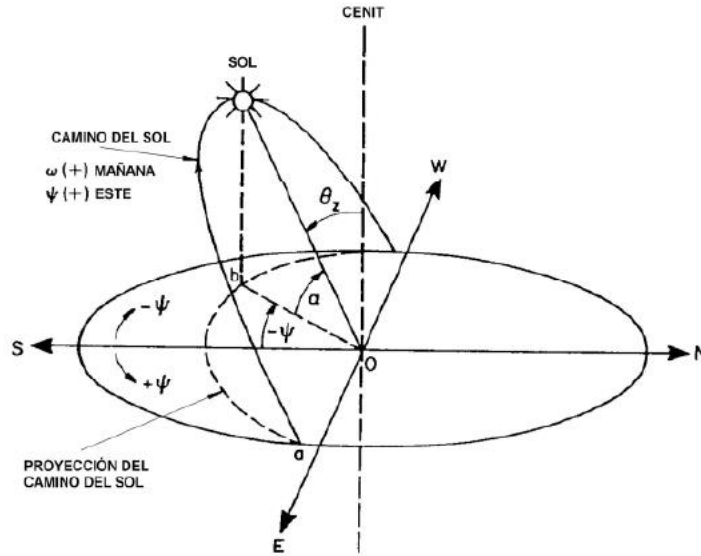
El día tipo es un valor medio de la declinación para cada mes, su finalidad es de simplificar los cálculos, este es un día teórico con respecto a la declinación nos presenta una radiación diaria extraterrestre media mensual, en la Tabla 1.1 se indica el día tipo y el valor de la declinación, además del número del día del año [1].

**Tabla 1.1** Día tipo recomendados para valores de declinación por meses y días del año (n) [13]

Mes	Día Tipo	N del día del año	Declinación
Enero	17	17	-20,9
Febrero	16	47	-13
Marzo	16	75	-2,4
Abril	15	105	9,4
Mayo	15	135	18,8
Junio	11	162	23,1
Julio	17	198	21,2
Agosto	16	228	13,5
Septiembre	15	258	2,2
Octubre	15	288	-9,6
Noviembre	14	318	-18,9
Diciembre	10	344	-23

Podemos determinar la radiación solar sobre una superficie horizontal, realizando una relación trigonométrica, como en la figura 1.8 es la relación entre las coordenadas sobre la tierra y la posición del sol en el cielo [12].





**Figura 1.8.** Relación entre la posición del sol en el cielo y las coordenadas sobre la tierra.

**Fuente:** E. Sierra, «Documento pdf,» 01 11 2010. [En línea]. Available:

[http://www.fing.edu.uy/if/solar/proyectos/SOLARIMETRIA\\_E.Sierra\\_.pdf](http://www.fing.edu.uy/if/solar/proyectos/SOLARIMETRIA_E.Sierra_.pdf). [Último acceso: 31 10 2013].

Para poder calcular la radiación solar sobre una superficie plana, podemos observar en la figura, algunos ángulos, de los que podemos sacar las siguientes ecuaciones (1.9), (1.10) y las cuales nos ayudan para poder calcular la ecuación (1.11), en la cual veremos la irradiancia extraterrestre sobre un plano horizontal  $G_{ph}$  [12].

$$\cos \theta_z = \sin \delta * \sin \varphi + \cos \delta * \cos \varphi * \cos \omega \quad (1.9)$$

$$\cos \psi = [( \sin \alpha * \sin \varphi + \sin \delta ) / ( \cos \alpha * \cos \varphi )] \quad (1.10)$$

$$G_{ph} = \left( \frac{G_{sc} * \cos \theta_z}{r^2} \right) \quad (1.11)$$

Dónde:

$\theta_z$ : ángulo cenital

$\alpha$ : altura solar

$\omega$ : ángulo horario

$\psi$ : azimut local

$\varphi$ : latitud geográfica

La radiación solar difusa sobre un plano horizontal que procede de la radiación solar difundida por la bóveda celeste, se lo calcula en base a la radiación solar global y la radiación solar directa, como se observa en la ecuación (1.12) [12].

$$Hd = H - Hb \quad (1.12)$$

Dónde:

$Hb$ : Radiación directa diaria.

$Hd$ : Radiación difusa diaria.

$H$ : Radiación global diaria.

### 1.2.2.2 Radiación solar sobre un plano inclinado

Para el cálculo de la irradiancia sobre un plano inclinado ( $G_{pi}$ ), tenemos 3 términos, la irradiancia directa, difusa y reflejada sobre un plano inclinado, como lo demuestra la ecuación (1.13) [12]:

$$G_{pi} = G_{bpi} + G_{dpi} + G_{rpi} \quad (1.13)$$

Dónde:

$G_{pi}$ : irradiancia solar sobre un plano inclinado.

$G_{bpi}$ : irradiancia directa sobre un plano inclinado

$G_{dpi}$ : irradiancia difusa sobre un plano inclinado

$G_{rpi}$ : irradiancia reflejada sobre un plano inclinado

El ángulo de incidencia ( $\theta$ ), que es el ángulo comprendido entre la radiación directa en una superficie y la recta normal a dicha superficie, se lo calcula con la ecuación (1.14) [12].

$$\cos\theta = \cos\theta_z * \cos\delta + \sin\theta_z * \sin\beta * \cos(Y_s - Y) \quad (1.14)$$

Dónde:

$\beta$ : ángulo entre el plano inclinado y el plano horizontal.

$Y$ : ángulo de orientación azimutal del plano inclinado.

$Y_z$ : ángulo de azimut solar.

Para el cálculo de la radiación directa sobre un plano inclinado son necesarias las ecuaciones anteriormente vistas, las ecuaciones (1.9) y la (1.14), que determina un factor geométrico de corrección y como se sabe el valor de la radiación directa en un plano inclinado, se puede determinar la ecuación (1.15) [12]:

$$G_{bpi} = \left( \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \right) * H \quad (1.15)$$

Para el cálculo de la radiación reflejada sobre un plano inclinado es necesaria la ecuación (1.11) y el factor de reflectividad ( $\rho$ ), se le puede dar un valor de 0,2 en caso de no conocer su valor con las cuales se puede determinar la ecuación (1.16).

$$G_{rpi} = \rho * \frac{G_{oph} * (1 - \cos\beta)}{2} \quad (1.16)$$

Una vez en este punto se describirá el cálculo de la radiación difusa que necesitamos para encontrar la radiación solar en un plano inclinado, se describirá uno de los modelos más usados es:

Modelo isotrópico de Liu y Jordan, para el cual necesitamos la ecuación (1.12) que nos ayudará en la ecuación (1.17) [12].

$$G_{dpi} = \frac{H_d * (1 + \cos\beta)}{2} \quad (1.17)$$

### **1.3 Formas de Aprovechar el Recurso Solar**

Hay varias formas de aprovechar el recurso solar, pero se dividen en dos grandes grupos, estos grandes grupos se clasifican en pasivas o activas dependen de la forma en que la capturan, la convierten y la distribuyen como lo veremos a continuación:

#### **1.3.1 Aprovechamiento pasivo del recurso solar**

Este tipo de aprovechamiento del recurso solar se caracteriza por la forma en la que distribuye la energía solar captada y almacenada, ya que lo hace de forma natural, sin necesidad de otros elementos, entre las aplicaciones de estos sistemas pasivos están la calefacción y refrigeración. Su aprovechamiento se da con la utilización de elementos arquitectónicos, enmarcadas en la arquitectura bioclimática, en la cual veremos la edificación para el aprovechamiento de los recursos, como el sol, viento, con la utilización de estos elementos se minimiza el consumo energético y con ello se reduce el impacto ambiental [1].

Como anteriormente se mencionó se caracterizan por los materiales empleados y su forma de distribuir la energía solar que es natural y estos no requieren el aporte de otra tipo de energía, los elementos para la arquitectura solar pasiva son los que veremos a continuación:

**Masa Térmica:** Es aquella conformada por material acumulador específico para agua, tierra y piedra, la cual también tiene como misión almacenar la energía solar captada [1].

**Acristalamiento:** Esta es la que retiene el calor como un invernadero, una vez captada [1].

En conclusión estos diseños arquitectónicos van orientados a que se favorezca la autocorrección térmica favoreciendo a que en los edificios estén en verano fresco y en invierno cálidos, mejorando los cerramientos, con ventanas de acristalamiento, evitando fugas de calor. La utilización adecuada de ventanas refrescan el verano y proporcionan iluminación natural, siendo más beneficioso que la iluminación artificial [14].

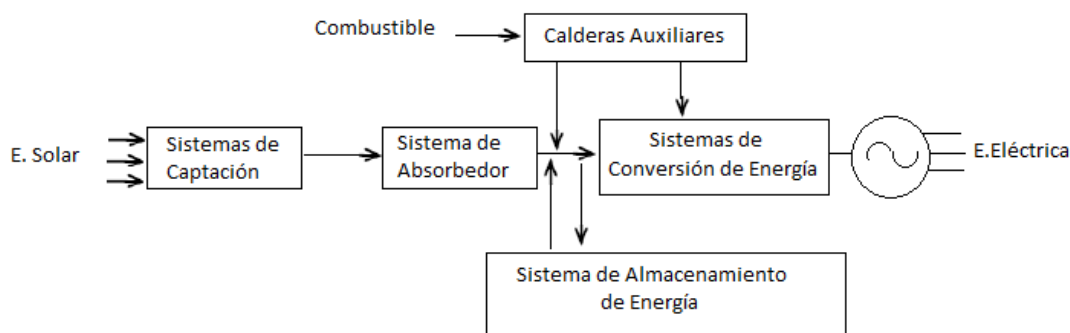
### 1.3.2 Aprovechamiento pasivo del recurso solar

Este tipo de aprovechamiento del recurso solar se puede dar de dos formas: como conversión térmica y conversión fotovoltaica.

#### 1.3.2.1 Conversión térmica

La conversión térmica es el aprovechamiento de la radiación solar que se da por un proceso de captación de la radiación solar que calienta algún medio, transformándolo en energía térmica, es decir que se base en la absorción del calor que llega del sol como por ejemplo la calefacción, refrigeración, secado. La conversión térmica puede ser de baja, media y alta temperatura, en la cual se utilizan colectores, en este tipo absorben el calor y lo transmiten a fluidos como el agua [14].

La conversión térmica por lo expresado anteriormente se da en las centrales eléctricas termosolares, que tienen como objetivo aprovechar la radiación solar mediante su concentración por medio de espejos logrando convertir vapor en altas temperaturas, que accionan una turbina y un generador. Estas centrales generan energía eléctrica similar a las convencionales, por el hecho de que queman carbón o petróleo. Las centrales termosolares tienen un rendimiento del 16 y 20 por ciento de eficiencia, la Figura 1.9 nos muestra un esquema básico de una central termoeléctrica solar [15].



**Figura 1.9.** Estructura de una central eléctrica termosolar.

**Fuente:** S. S. «Centrales Solares,» 11 2009. [En línea]. Available:

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/277/A6.pdf?sequence=6>.

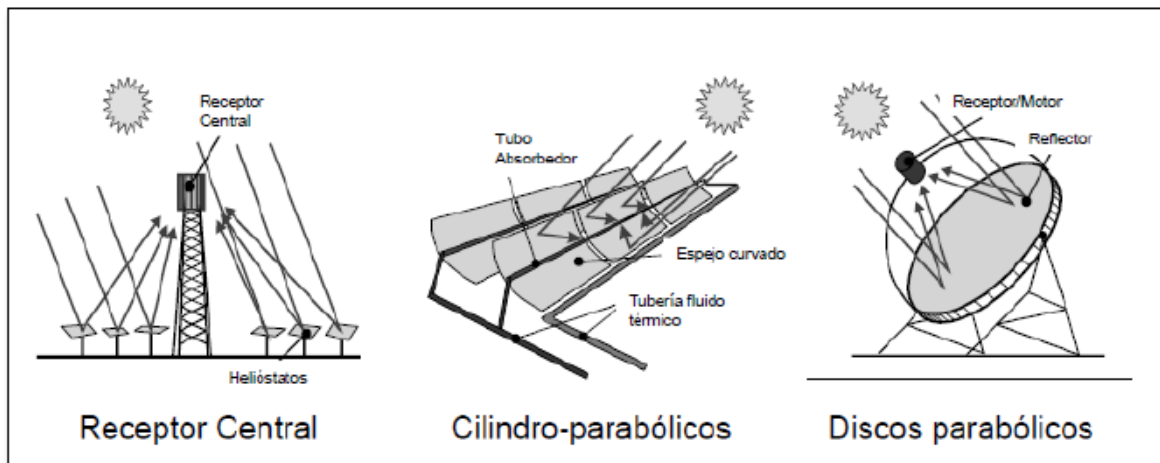
[Último acceso: 05 11 2013].

Cada instalación depende de la temperatura de aplicación, en función de su temperatura, las instalaciones solares se clasifican:

Sistemas de aprovechamiento de baja temperatura: son aquellas que en las que el fluido no alcanza el punto de ebullición, tienen como componentes los captadores planos, estos tienen un medio de almacenamiento permitiendo utilizar el líquido calentado en periodos diferentes a la conversión térmica [14].

Sistemas de aprovechamiento de media temperatura: son aquellos que generan vapores a altas temperaturas generalmente utilizados en procesos industriales. El captador utilizado es el cilíndrico-parabólico como el de la Figura 1.10, está recubierto de un material reflejante, el cual concentra la radiación solar sobre un tubo receptor [14].

Sistemas de aprovechamiento de alta temperatura: son aquellas que trabajan con elevadas temperaturas permitiendo calentar un fluido, este fluido transmite el calor a otro circuito secundario por el que circula un fluido secundario, el cual una vez transformado en vapor pone en marcha una turbina acoplada a un alternador que permite la transformación a energía eléctrica, su funcionamiento es similar a una central térmica pero con diferencia de que el calor es recibido directamente del sol. Hay diferentes tipos de centrales solares entre los más comunes tenemos: las centrales solares tipo torre central y las centrales solares tipo disco parabólico como las de la Figura 1.10, que las veremos a continuación [14].



**Figura 1.10** Tecnologías termosolares para la generación de electricidad.

**Fuente:** S. S. «Centrales Solares,» 11 2009. [En línea]. Available:

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/277/A6.pdf?sequence=6>.

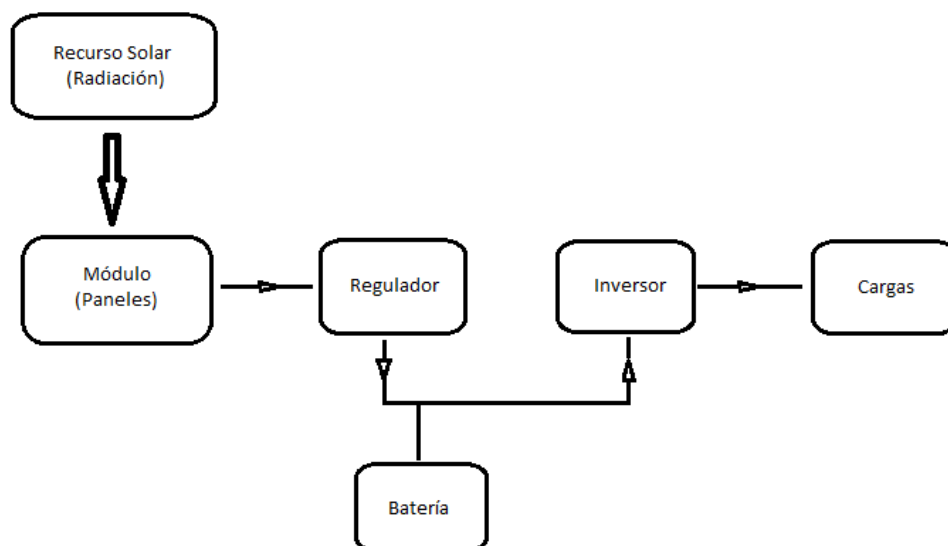
[Último acceso: 05 11 2013].

### 1.3.2.2 Conversión Fotovoltaica

La conversión fotovoltaica se da por el aprovechamiento de la energía solar al convertir la energía solar en energía eléctrica, que se basa en el efecto fotovoltaico, que aprovecha la energía solar por medio de celdas fotoeléctricas, la cual no pasa por un efecto térmico [16].

Las celdas fotovoltaicas están constituidos por un material semiconductor como puede ser silicio, el principal material que se usa en la fabricación de las células fotovoltaicas son los semiconductores. La principal propiedad de este tipo de materiales es que la energía necesaria para separar a ciertos electrones de su núcleo es similar a la energía de los fotones que constituyen la luz solar. Se les llama semiconductores debido a su comportamiento eléctrico [17].

Los principales componentes de una instalación solar fotovoltaica son: las celdas fotovoltaicas, la batería, el regulador y el inversor como en la Figura 1.11 [17].



**Figura 1.11.** Instalación solar fotovoltaica.

**Fuente:** J. C. Y. y. J. M. Lopez, «T E S I S - Instituto Politécnico Nacional,» 2009. [En línea]. Available: <http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/5641/1/ESTUDIOELECTRIFICAC.pdf>. [Último acceso: 01 04 2013].

### 1.3.3 Ventajas al aprovechar el recurso solar

La energía solar nos presenta varias ventajas como fuente energética, que depende de varios factores como su naturaleza, economía del país, políticas energéticas, entre otras, que las veremos a continuación.

Al aprovechar el recurso solar como una fuente energética renovable, producirá un menor impacto ambiental, pero sin pensar que la energía solar no contamina, debido a que se debe tener en cuenta su ciclo de vida, y dentro de este tiempo se realizará su construcción y se debe realizar su mantenimiento [1].

Una ventaja también se daría ya que se reduciría la dependencia de los combustibles fósiles, debido a su mínimo impacto ambiental y su no dependencia de combustibles fósiles y la reducción de la dependencia energéticas de terceros, además que es un sistema silencioso, a diferencia de otros que producen mucho ruido, como en la generación de energía eléctrica por medio de una central hidroeléctrica [1].



Los precios de instalación son muy altos pero es una tecnología a largo plazo más económica que las convencionales porque esta no ocupa combustibles y a medida que el tiempo pasa aumenta el costo de los combustibles fósiles, su fuente es inagotable y ayuda a la contribución de un desarrollo sostenido [1].

## **1.4 Aplicaciones**

La energía solar además de las aplicaciones antes vistas puede aplicarse para otros fines, no muy usuales, que las detallaremos a continuación:

### **1.4.1 Energía solar por refrigeración**

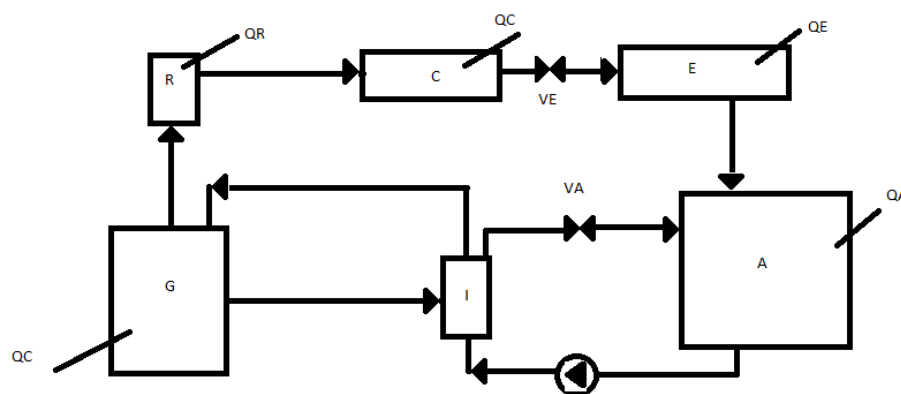
Esta aplicación de la energía solar se la realiza en lugares donde en el año la radiación solar es muy elevada debido a que la demanda de calefacción es baja mientras que la demanda de refrigeración es alta en lugares muy cálidos, la refrigeración a partir de la energía solar ayudaría mucho en el impacto ambiental, la refrigeración por energía solar se puede dar por la absorción amoníaco agua y por la absorción bromuro de litio agua, como lo detallaremos a continuación [1].

#### **1.4.1.1 Refrigeración por absorción amoníaco-agua**

Este método de refrigeración por absorción amoníaco-agua comienza cuando entra en un generador, a la cual aportan una temperatura elevada entre 110 y 150 grados Celsius, una disolución de amoníaco con agua, de la cual sale una disolución diluida de amoníaco-agua y vapor de agua mezclado con amoníaco, el calor es aportado del exterior, luego pasa al rectificador (R), la cual seca la mezcla el vapor de agua mezclado con amoníaco de tal forma que luego tengamos vapor de amoníaco, necesitando refrigeración, luego pasa a otro elemento que veremos en la Figura 1.12, que es el condensador (C), aquí el vapor de amoníaco se vuelve líquida porque es sometida a presiones elevadas que enfrían y finalmente la vuelven líquida necesitando igualmente refrigeración [1].

La siguiente etapa es la evaporadora (E) que esta después de una válvula de expansión

que provoca a la mezcla liquido-vapor de amoníaco la caída de presión necesaria para que el evaporador este a la temperatura deseada, vaporizando el amoníaco, con ayuda de calor del exterior, luego pasamos a otra etapa el absorbedor (A), aquí recibe la disolución diluida amoniaco-agua del generador y también el vapor de amoniaco del evaporador, el vapor de amoniaco en la solución diluida se disuelve, y la disolución concentrada resultante retorna al generador, cerrando el ciclo, luego una bomba de presión que necesita energía mecánica para ser accionada hace circular las disoluciones manteniendo la diferencia de presión necesaria, las dos válvulas que vemos en la Figura 1.12, hacen que la diferencia de presión entre el generador-rectificador-evaporador una presión alta y entre evaporador-absorbedor una presión baja se mantengan. Por último un intercambiador de calor entre el absorbedor y el generador, ahorra energía térmica permitiendo que se caliente la corriente que va al generador [1].



**Figura 1.12.** Máquina de refrigeración por absorción amoníaco-agua.

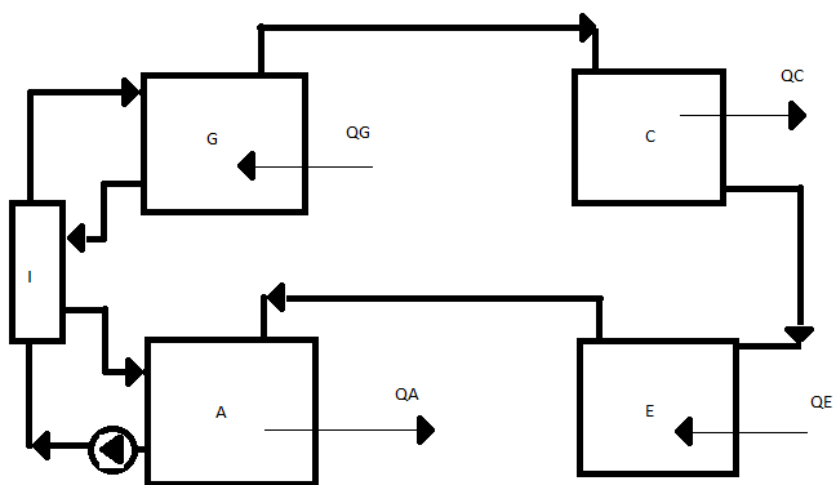
**Fuente:** L. Jutglar, *Energía Solar*, Ediciones Ceac ed., vol. 1, Barcelona : Aleph, 2004, p. 265.

#### 1.4.1.2 Refrigeración por absorción bromuro de litio-agua

Este método de refrigeración por absorción bromuro de litio-agua, es similar al anterior, y comienza con un generador (G) que produce vapor de agua con calor del exterior, esto se da debido a la disolución diluida del bromuro de litio, que entra en el generador y genera una disolución concentrada, en el condensador (C) aquí el vapor que sale se enfría y condensa, el vapor procedente del generador, luego en la etapa del evaporador (E), del condensador procede el agua líquida, la cual se evapora y al absorbedor (A) nos llega del

generador una disolución del bromuro de litio fría y concentrada, como lo veremos en la Figura 1.13, esta nos crea una presión de vapor muy reducida, mientras que las bombas de circulación se encargan de mantener las corrientes en movimiento [1].

Un intercambio de calor (I) este ahorra energía térmica en el generador está situado entre el generador y el absorbedor, su funcionamiento requiere de calor al generador temperaturas entre los 110 y los 150 grados Celsius [1].



**Figura 1.13.** Máquina de refrigeración por absorción bromuro de litio-agua.

**Fuente:** L. Jutglar, *Energía Solar, Ediciones Ceac ed., vol. 1, Barcelona : Aleph, 2004, p. 265.*

#### 1.4.2 Aplicación en el secado de productos agrícolas

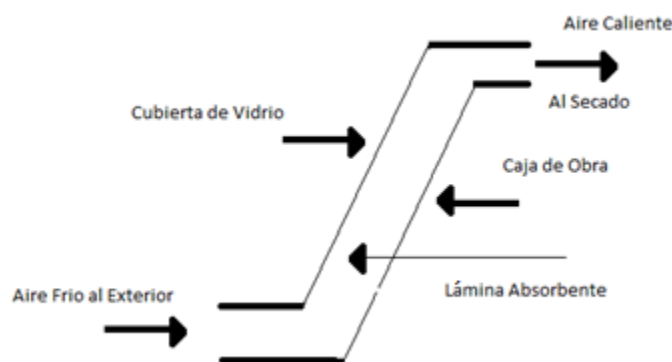
La Energía solar puede ser aplicada para el secado de productos agrícolas, debido a que en la actualidad muchos productos deben secarse para poder almacenarlos, para esto el calor es proporcionado por una corriente de aire caliente, impulsada por un ventilador y es calentada por un intercambiador de calor, el cual se alimenta con vapor de una caldera o a su vez gases calientes que son procedentes de combustión, permitiendo con este proceso el uso y consumo de combustible fósil, perjudicial para el medio ambiente [1].

Tratando de evitar el impacto ambiental que puede producir el sistema de secado antes mencionado se puede utilizar colectores solares pasivos de aire, sabiendo que la mayoría de

productos son granos o fibras aprovechando que el aire circule por ellos, para esto se mostrará un esquema del colector solar en la Figura 1.14 , consta de una caja que por dentro está de un conjunto de láminas metálicas de color negro que absorben la radiación solar y que está cubierta de una lámina de cristal incolora y transparente [1].

*“Por la base del colector entra aire exterior, frío y seco, que circula alrededor de las láminas metálicas, sale caliente por la parte superior y se dirige hacia el secadero. La circulación se mantiene a causa de la diferencia de densidad entre el aire que sale. Puesto que la densidad del aire caliente y húmedo es menor que la densidad del aire frío y seco, todo el conjunto funciona como una chimenea: se alcanza una velocidad de equilibrio entre la pérdida de carga a través del colector y el secadero y el tiro de la chimenea”<sup>2</sup>.*

Hay una diferencia de densidad esto se da por es mayor la densidad de aire frío y seco que la del aire caliente y húmedo, esto causa una velocidad de equilibrio, que permite y el aire circulará sin necesidad de ventiladores. El sistema funciona sin consumo de combustible ni electricidad.



**Figura 1.14.** Colector solar térmico para obtener aire caliente.

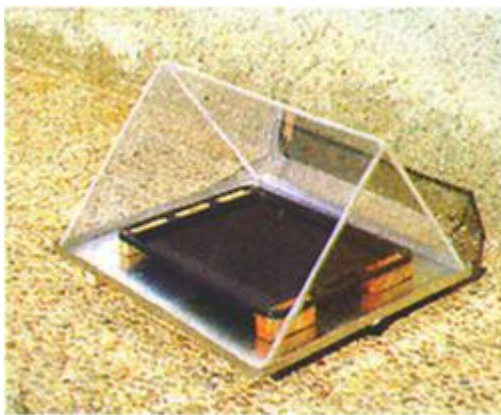
**Fuente:** L. Jutglar, *Energía Solar*, Ediciones Ceac ed., vol. 1, Barcelona : Aleph, 2004, p. 265.

<sup>2</sup> L. Jutglar, *Energía Solar*, Ediciones Ceac ed., vol. 1, Barcelona : Aleph, 2004, p. 49.

### 1.4.3 Aplicación en la destilación de agua

La Energía solar además de la aplicación en el secado de productos agrícolas, se lo puede aplicar en la destilación de agua, debido a que en muchos sectores de nuestro país hay abundancia de sol y escasez de agua, y esto pasa por potabilizar el agua, pero el problema es que los métodos convencionales para potabilizar el agua de pozos o mar se los hacen con equipos convencionales como recompresión de vapores, destilación por etapas, usando todos energías convencionales, que perjudican al medio ambiente [1].

La solución menos perjudicial para el medio ambiente sería la destilación de agua, usando el recurso solar para esto la idea es realizar el ciclo natural del agua, por la que el agua se evapora y se condensa en las nubes y luego se precipita en forma de lluvia, es decir que el agua a deshidratar se dispone en un recipiente plástico de color negro colocada en el interior del destilador es con base metálica, como lo veremos en la Figura 1.15, entonces la radiación solar atraviesa el vidrio que incide sobre el recipiente negro evaporando el agua por el aumento de la temperatura, formando en el destilador una atmósfera saturada, la cual en contacto con la cara interior del vidrio se condensa, provocando la inclinación del vidrio que las gotas de agua condensada se deslicen hasta el inferior depositándose el agua destilada [18].



**Figura 1.15.** Modelo del destilador solar de agua.

**Fuente:** «Cocina Solar,» Artesanal, [En línea]. Available: <http://www.cocinasolar.org/cocinas/destilador-solar-de-caseta>. [Último acceso: 26 11 2014].

## CAPÍTULO II

### PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

Para el presente capítulo el punto de partida es el efecto fotovoltaico, que es la conversión de la energía solar en electricidad, para esto un sistema solar fotovoltaico consta de los módulos o células solares, las baterías o acumuladores, reguladores y convertidores, cada uno con su importancia, los paneles solares se clasifican dependiendo del material con el que se fabricaron y pueden ser: de silicio, arseniuro de galio, telurio de cadmio y sulfuro de cadmio, entre otros, la eficiencia de las células solares dependen del material siendo el silicio el más utilizado, la temperatura también es un factor muy importante que afecta en el rendimiento al igual que la posición. La energía solar fotovoltaica genera impacto ambiental en la fabricación de sus componentes donde se generan residuos o al dismantelar la instalación, también causa impacto visual en instalaciones grandes produciendo superficies reflejantes, que pueden ser molestos o peligrosos.

#### 2.1 Principio de Funcionamiento

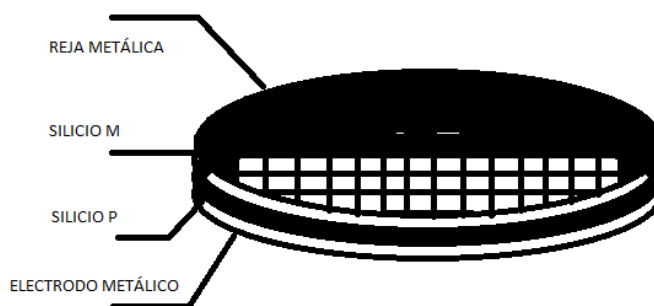
Uno de los métodos más utilizados para convertir energía solar en energía eléctrica es la generación de energía eléctrica por el uso de los paneles solares fotovoltaicos, siendo una energía que no produce un alto impacto en el medio ambiente [1].

El proceso fotovoltaico es una tecnología que convierte la energía solar en corriente eléctrica, la cual se la puede utilizar en ese momento o almacenar en una batería, el efecto fotovoltaico es la generación de una fuerza electromotriz, siendo el resultado de la absorción de radiación. Las celdas fotovoltaicos o las celdas solares son transductores el cual convierte la energía del sol en electricidad, es decir que se comporta como un diodo semiconductor que desarrolla voltajes de 0.5 – 1V y una corriente de 20 – 40 mA/cm<sup>2</sup> que dependen de las condiciones del sol y de los materiales utilizados [7].

*“El efecto fotovoltaico se puede observar en forma natural en una variedad de materiales, pero los que tienen un mejor desempeño en la luz solar son los*

*semiconductores. Cuando los fotones de la luz solar son absorbidos en un semiconductor, se crean electrones libres (y agujeros) con energías más altas que los electrones que proporcionan la vinculación en la base de cristal. Una vez que estos pares de huecos o agujeros de electrones libres son creados, debe haber un campo eléctrico para inducir estos electrones de energía más altas a fluir fuera del semiconductor para desarrollar un trabajo útil. En una celda solar típica esto se puede hacer mediante el uso de uniones p-n. Es sabido que si un campo eléctrico existe a través de una unión p-n, este campo recoge a los electrones en una dirección ya los agujeros en otra.*”<sup>3</sup>

De lo anteriormente expuesto se puede decir que el semiconductor es el material que me permite absorber los fotones de la luz solar creando electrones, que deben ser inducidos por un campo magnético a fluir fuera del semiconductor para desarrollar un trabajo, esto se hace en base a la utilización de la unión p-n, en una celda solar. Usualmente las celdas fotovoltaicas usan el silicio como material semiconductor, para las celdas solares se tiene una especie de obleas delgadas que son tratadas para formar el campo eléctrico, en la Figura 2.1 podemos observar el diagrama de una celda fotovoltaica.



**Figura 2.1** Diagrama de una fotocelda de silicio cristalino.

**Fuente:** G. E. Harper, *El ABC de las instalaciones eléctricas en sistemas eólicos y fotovoltaicos*, G. Noriega, Ed., Mexico D.F.: LIMUSA, 2012, p. 365.

---

<sup>3</sup> G. E. Harper, *El ABC de las instalaciones eléctricas en sistemas eólicos y fotovoltaicos*, G. Noriega, Ed., Mexico D.F.: LIMUSA, 2012, p. 112.

### **2.1.1 Componentes de un sistema solar fotovoltaico**

Entre los componentes de un sistema solar fotovoltaico tenemos: el panel solar, los acumuladores o baterías, los reguladores, convertidores de corriente continua a corriente continua e inversor, entre otras.

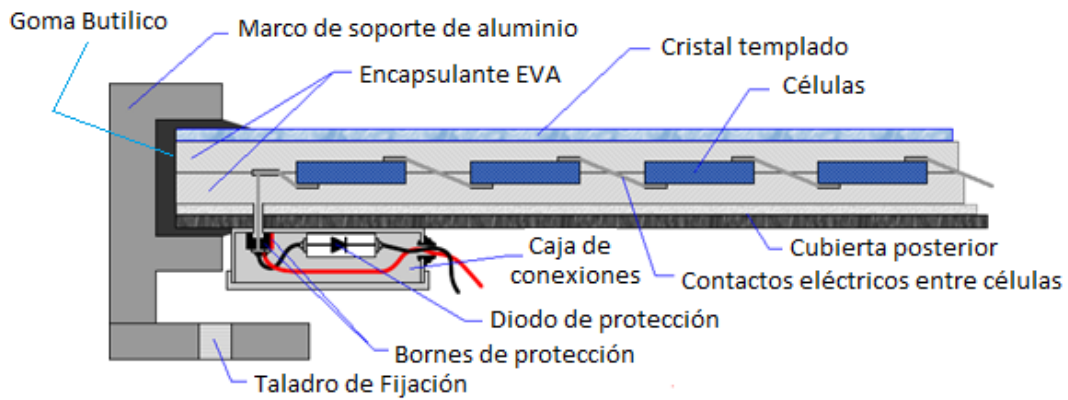
#### **2.1.1.1 Panel solar en un sistema solar fotovoltaico**

El panel solar es la parte más importante de los sistemas fotovoltaicos, su objetivo es el de captar la energía radiación solar incidente para así generar una corriente eléctrica, las células solares proporcionan valores de tensión, son frágiles, carecen de soporte y no son aisladas eléctricamente, por esto deben ser ensambladas adecuadamente para ser una sola estructura. Para poder incrementar el valor de tensión y corriente suministrada por el panel es necesario que las células estén conectadas entre sí, sea en serie o en paralelo [3].

Una conexión de módulos en serie de las mismas características, dan como resultado la suman de sus voltajes mientras que la corriente se mantiene, como por ejemplo si el voltaje es de 12V y la corriente es de 2A, en un conjunto de dos módulos tengo un voltaje de 24V y una corriente de 2A. En paralelo una conexión de módulos me da como resultado que su voltaje se mantiene y sus intensidades se suman. Una conexión mixta se la realizaría para satisfacer necesidades de tensión, agrupándolas serie-paralelo [15].

Los paneles solares al ser fabricados tienen algunas características comunes, por lo que podemos decir que están conformados por los elementos mostrados en la Figura 2.2 que son: material encapsulante, células o celdas solares y sus conexiones eléctricas, cubierta posterior y marco metálico. También pueden formar parte de estos elementos los mecanismos de seguimiento y sensores [4].

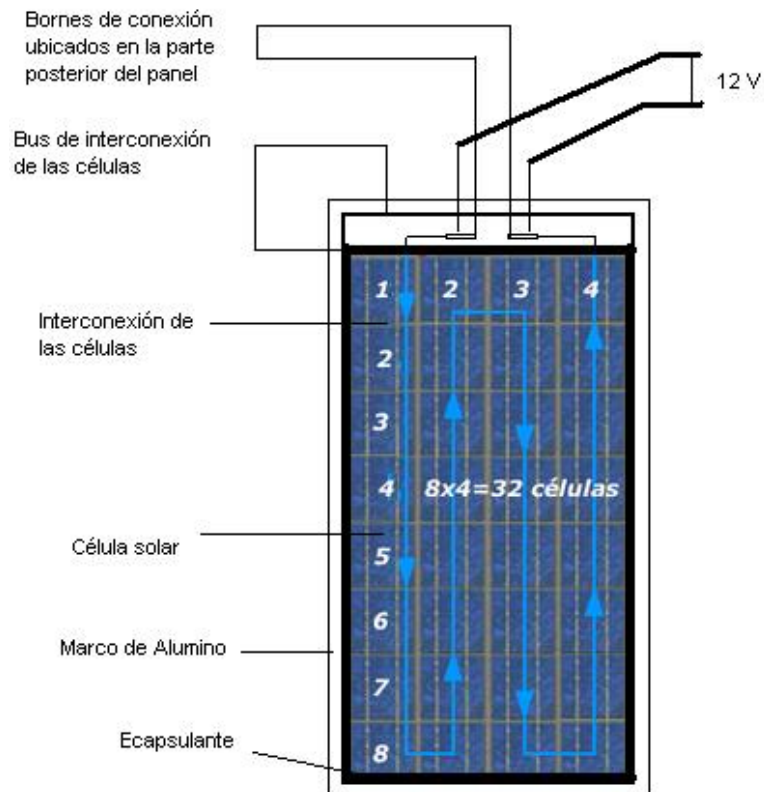




**Figura 2.2** Elementos de los paneles solares.

**Fuente:** «CURSOLAR,» [En línea]. Available:

[http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/04\\_componen/01\\_generador/01\\_basico/4\\_gene\\_01.htm](http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/04_componen/01_generador/01_basico/4_gene_01.htm). [Último acceso: 10 12 2013].



**Figura 2.3** Vista frontal de los elementos de los paneles solares.

**Fuente:** «CURSOLAR,» [En línea]. Available:

[http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/04\\_componen/01\\_generador/01\\_basico/4\\_gene\\_01.htm](http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/04_componen/01_generador/01_basico/4_gene_01.htm). [Último acceso: 10 12 2013].

El material encapsulante es copolímero está situada entre las células solares y el vidrio, recubierta a ambos lados como se observa en la Figura 2.2, es un material con un índice de refracción muy similar al del vidrio, es una protección que evita la entrada de polvo, agua y que se concentre humedad, además tiene cierta plasticidad, permitiendo absorber las tensiones que producen los golpes, no se degradan fácilmente. El copolímero es una macromolécula que es conocido como EVA por etileno-acetato de vinilo [4].

La cubierta frontal es de vidrio templado de 3-4 mm de espesor, su misión es el de proteger las células contra cualquier eventualidad, como puede ser un impacto por cualquier factor externo, está cubierta debe tener una textura con baja reflexión de la luz, para aprovechar al máximo la energía solar incidente, debe tener un bajo contenido en sales de hierro, el material debe ser impermeable al agua.

La cubierta posterior es un aislante eléctrico que está formado por varias capas, este aislante es denominado Tedlar, su objetivo es el de proteger al módulo, al ser impermeable y con baja resistencia térmica es una barrera contra la humedad. El Tedlar es opaco y de color blanco lo que permite reflejar la luz que pasa por las células devolviéndola a la parte frontal. Hay casos en los que además de utilizar una capa el aislante Tedlar, colocan un segundo vidrio, pero hay otros que usan de cubierta posterior metálica, permitiendo mejor disipación de calor [4].

El marco metálico de la Figura 2.3 es de aluminio anodizado o acero inoxidable, su objetivo es el de formar estructuras al ser la parte que le da rigidez, tiene los taladros necesarios para anclaje, se debe colocar por todo el perímetro del marco una junta selladora de silicona, goma butílica o material sellante la presencia de humedad dentro del panel.

Las cajas de conexiones eléctricas, se encuentran en la parte posterior, tienen que tener una protección adecuada del cableado contra fenómenos externos y la humedad, esto debido a que están a la intemperie, deben ser accesibles. Los diodos de by-pass como los de la Figura 2.2, son parte de la caja de conexiones estas protegen individualmente a los paneles de daños que pueden ocasionarse por las sombras parciales, ocasionando que las

células no actúen como receptores. Los diodos de bloque son colocados a la salida de cada grupo de módulos, estos evitan que se disipe la electricidad de los módulos o las baterías, en caso de defecto eléctrico, también evitan que las baterías se descarguen en la noche [4].

#### **2.1.1.2 Baterías o Acumuladores en un sistema solar fotovoltaico**

Las baterías sirven para acumular energía, para después suministrar al circuito cuando lo requiera, estos elementos pueden una vez descargadas volverse a cargar, son pilas reversibles, estas son elementos básicos en instalaciones que generan energía eléctrica a partir de un generador fotovoltaico.

Como se sabe las baterías suministran corriente continua, por lo tanto se carga con corriente continua, los valores nominales de voltajes son de 2 y 12 voltios, la capacidad de carga de la batería depende de la temperatura, ya que si la capacidad es menor a la nominal que es la indicada por el fabricante, su capacidad disminuye; mientras que si la temperatura es mayor a la nominal, su capacidad aumenta pero se disminuye el ciclo de vida o de descarga de la batería [21].

La descarga de una batería afecta a la vida útil de la batería, es decir que entre menos profunda sea la descarga mayor será su vida útil, es decir que si el tiempo de carga es corta es menor la capacidad de la batería, mientras que si el tiempo de carga es larga, es mayor la capacidad de la batería. Una descarga superficial es el (20%) de la descarga media o una descarga profunda que puede llegar a un (80%), para aplicaciones fotovoltaicas se las fabrica para que soporten una descarga del 80% de su capacidad. [4].

Las baterías que más se utilizan en aplicaciones fotovoltaicos son las de plomo-ácido, como los de la Figura 2.4, estas se adaptan de mejor manera a los sistemas de generación fotovoltaica, están compuestos por dos electrodos, uno de dióxido de plomo y el otro de plomo metálico, estos electrodos están inmersos en un electrolito de ácido sulfúrico que esta diluido en agua, el electrolito puede estar en forma de líquido o de gel, en un recipiente. Las baterías de plomo-acido son los de tipo abierto que necesitan un consumo alto de agua y los tubulares, que entre sus ventajas tienen mejores propiedades a niveles

bajos de descarga, soportan grandes descargas y en el ciclo de carga y descarga se deterioran menos [4].

Otro tipo de baterías utilizadas en sistemas fotovoltaicos son las baterías de gel estas son selladas, y el ácido tiene la forma de gel, estas funcionan en cualquier posición y son cerradas, estas tienen mayor resistencia a bajas temperatura y la corrosión es reducida, otra ventaja es que en descargas profundas tienen menor afectación [22].

Las baterías de níquel-cadmio están diseñadas específicamente para aplicaciones fotovoltaicas, tienen un voltaje nominal de 1,2 V, estos aguantan procesos de descongelación y congelación, el costo de estas son muy elevadas a diferencia de las de plomo-ácido, estas pueden descargarse totalmente sin sufrir daños y las sobrecargas les afecta menos [4].



**Figura 2.4** Tipos de baterías solares plomo-ácido.

**Fuente:** I. C. O. y. I. R. Arivilca, «Manual de Energía Solar Fotovoltaica,» 2010. [En línea]. Available: [http://energiaverde.pe/wp-content/uploads/2010/06/Manual\\_ES\\_Fotovoltaica.pdf](http://energiaverde.pe/wp-content/uploads/2010/06/Manual_ES_Fotovoltaica.pdf) [Último acceso: 13 12 2013].

### **2.1.1.3 Reguladores en un sistema solar fotovoltaico**

Los reguladores son los encargados del control, su función es de gestionar el consumo directo de las placas, la carga de las baterías evitando sobrecargas o descargas profundas que puedan afectar a la batería, tienen alarmas que avisan de problemas que pueden tener las baterías, presentan protección electrónica contra cortocircuitos, sobretensiones, descargas profundas, contra inversión de polaridad, contra elevadas temperaturas, entre otras funciones que puede incorporar, en la Figura 2.5 lo podemos ver [21].

Hay dos tipos de reguladores que son los siguientes:

**Regulador paralelo:** Estas son utilizadas en instalaciones fotovoltaicas pequeñas, consiste en una resistencia disipadora y un diodo zéner, además que puede tener un diodo de bloque, que impida que se descargue la batería cuando no hay generación [21].

**Regulador serie:** Estas son utilizadas en instalaciones fotovoltaicas de mayor potencia de generación, esta consta de un relé mecánico que controla la desconexión del circuito de generación, este relé está controlada por un circuito de control de la carga abriendo el contacto cuando se carga la batería y cerrando el contacto cuando la batería comienza su descarga [21].

Además de las anteriores tipos de reguladores tenemos otras como lo son: reguladores de doble circuito, reguladores con dos niveles de carga, reguladores multietapa, relé de estado sólido [21].



**Figura 2.5** Reguladores o controladores de carga.

**Fuente:** I. C. O. y I. R. Arivilca, «Manual de Energía Solar Fotovoltaica,» 2010. [En línea]. Available: [http://energiaverde.pe/wp-content/uploads/2010/06/Manual\\_ES\\_Fotovoltaica.pdf](http://energiaverde.pe/wp-content/uploads/2010/06/Manual_ES_Fotovoltaica.pdf) [Último acceso: 13 12 2013].

#### **2.1.1.4 Inversores en un sistema solar fotovoltaico**

Los Inversores de corriente continua a corriente alterna (CC/CA), como el de la Figura 2.6, son dispositivos que transforman corriente continua en corriente alterna, es decir transforman la corriente continua de 12, 26 o 48V que producen los paneles solares en corriente alterna de 12 o 220 V, que son valores que nos suministra la red eléctrica. [4].

Los Inversores son una parte importante en una instalación fotovoltaica, estas tienen como base el empleo de dispositivos electrónicos los cuales interrumpen las corrientes al actuar como interruptores y conmutar su polaridad. Hay diferentes tipos de inversores, entre los cuales tenemos inversores de conmutación natural e inversores de conmutación forzada o autoconmutación [24].

Los inversores de conmutación natural o conmutada por la red, estos son usados a sistemas que se encuentran conectados a la red eléctrica, por medio de la conmutación se controlan el flujo de energía en el sentido deseado. Los inversores de conmutación forzada o autoconmutados, son utilizados en sistemas fotovoltaicos aislados, la apertura y cierra son forzadas por el controlador [4].



**Figura 2.6 Inversores.**

**Fuente:** J. C. Y. y. J. M. Lopez, «T E S I S - Instituto Politécnico Nacional,» 2009. [En línea]. Available: <http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/5641/1/ESTUDIOELECTRIFICAC.pdf>. [Último acceso: 01 04 2013].

### **2.1.2 Características de los paneles solares**

Los parámetros a tomar en cuenta para el comportamiento de un módulo fotovoltaico son:

**La tensión a circuito abierto ( $V_{ca}$ ):** Es aquel valor máximo de voltaje, si los terminales se los dejará en circuito abierto ( $I = 0$ ). Es una medida tomada sin carga, y su valor puede ser mayor al voltaje nominal, entonces el valor de la tensión de circuito abierto es la de cada una de sus módulos por el número de células conectadas en serie [4].

**La tensión de potencia máxima ( $V_{pm}$ ):** Este valor de tensión se da teniendo un valor de potencia máximo, cuando la corriente suministrada es la máxima en el panel.

**La tensión nominal ( $V_n$ ):** Es aquel valor al que trabaja el panel.

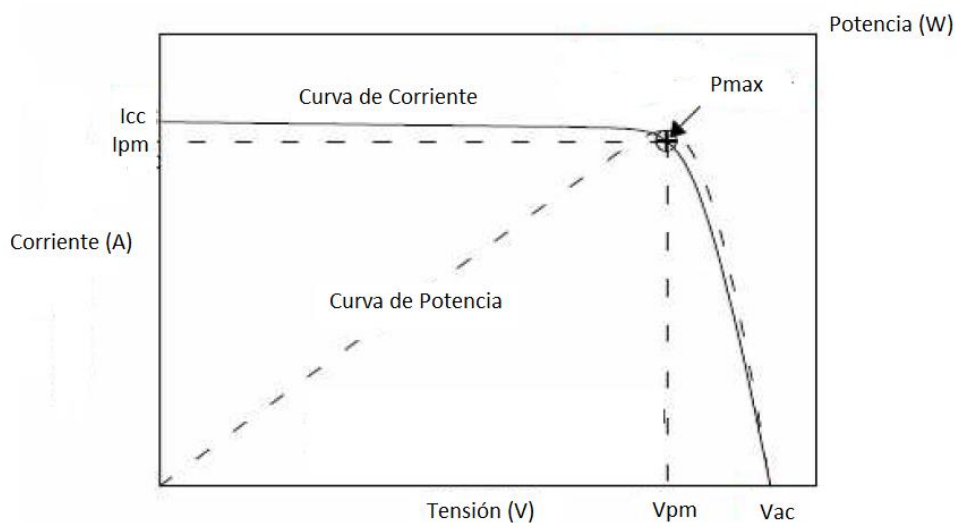
**La corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ ):** Se mide esta cuando está en cortocircuito ( $V = 0$ ). Esta corriente de cortocircuito en un módulo es una célula multiplicado por el número de filas conectadas en paralelo, es decir que es la corriente máxima que se puede obtener en un panel, esto depende de la radiación solar a la que está expuesta la célula o módulo [4].

**La corriente de potencia máxima ( $I_{pm}$ ):** Este valor es la corriente que suministra el panel trabajando a su máxima potencia.

**La potencia máxima ( $P_m$ ):** Llamado también potencia pico, es el valor que se obtiene multiplicando la corriente de potencia máxima y la tensión cuando la potencia es máxima [4].

### 2.1.3 Curva V-I

La curva V-I de la Figura 2.7, asocia valores de voltajes y corrientes de diferentes cargas, estos valores serán menores a los valores de la corriente de cortocircuito y el voltaje de circuito abierto. El punto de la curva en el que el voltaje es cero es donde se produce el cortocircuito a diferencia del circuito abierto que es en el punto donde la corriente es cero, para los dos casos la potencia de salida es cero. La potencia que el panel entrega a la carga está determinada por la corriente y el voltaje. [4].



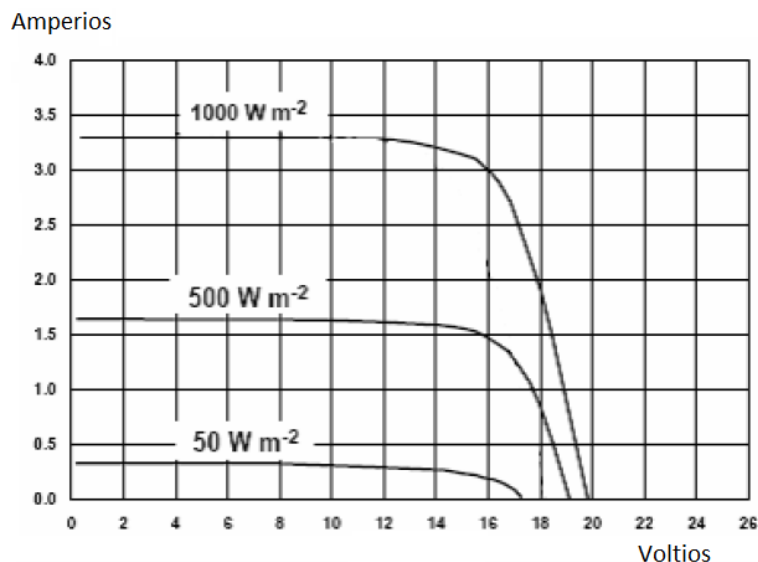
**Figura 2.7** Curva característica V-I.

**Fuente:** J. F. Ferichola, «Caracterización de Módulos Fotovoltaicos con Dispositivos Portátil,» [En línea]. Available: [http://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6037/PFC\\_Julio\\_Fernandez\\_Ferichola.pdf?sequence=1](http://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6037/PFC_Julio_Fernandez_Ferichola.pdf?sequence=1). [Último acceso: 06 12 2013].



### 2.1.3.1 Curva V-I en función de la irradiancia

La irradiancia solar es un factor que varía el comportamiento eléctrico de un módulo. La corriente es directamente proporcional a la radiación solar recibida como nos indica la Figura 2.8, el voltaje permanece más o menos constante, dando un aumento de potencia. En otras palabras a mayor irradiancia mayor corriente [4].



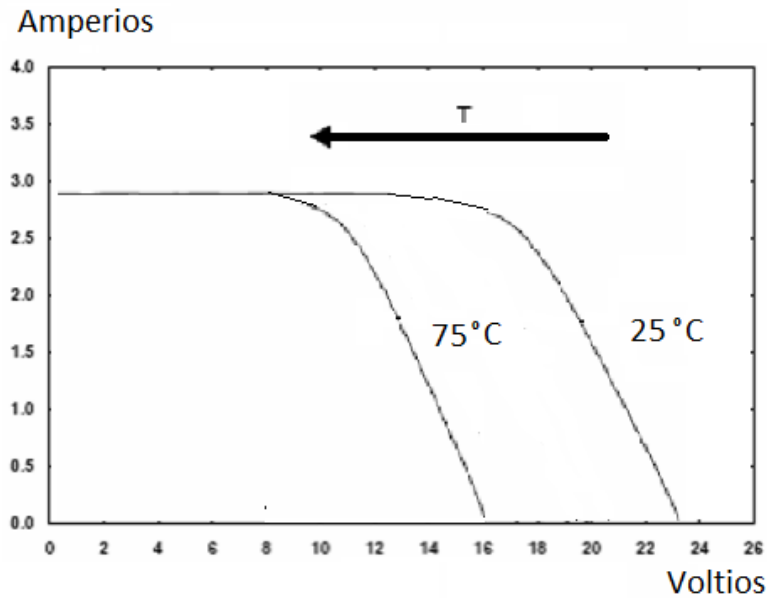
**Figura 2.8** Curva V-I en función de la irradiancia.

**Fuente:** J. F. Ferichola, «Caracterización de Módulos Fotovoltaicos con Dispositivos Portátil,» [En línea].

Available: [http://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6037/PFC\\_Julio\\_Fernandez\\_Ferichola.pdf?sequence=1](http://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6037/PFC_Julio_Fernandez_Ferichola.pdf?sequence=1). [Último acceso: 06 12 2013].

### 2.1.3.2 Curva V-I en función a la temperatura

La temperatura afecta al comportamiento de la célula produciendo cambios como la tensión generada varía inversamente a la temperatura de las células, pero no produce cambios en la corriente de salida. Por cada grado centígrado que sube, se reduce el voltaje del módulo de 0,04 a 0,1 voltios, es por esta razón que los paneles necesitan circular aire por detrás de cada módulo. Es decir que a mayor temperatura se reduce el voltaje, que está indicado en la Figura 2.9 [4].



**Figura 2.9** Curva V-I en función de la temperatura.

**Fuente:** J. F. Ferichola, «Caracterización de Módulos Fotovoltaicos con Dispositivos Portátil,» [En línea].  
 Available: [http://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6037/PFC\\_Julio\\_Fernandez\\_Ferichola.pdf?sequence=1](http://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6037/PFC_Julio_Fernandez_Ferichola.pdf?sequence=1). [Último acceso: 06 12 2013].

## 2.2 Clasificación

Los sistemas solares fotovoltaicos se clasifican por el tipo de células solares, sabiendo que la mayor parte de las células solares en la actualidad se comercializan de silicio pueden constituirse de cristales monocristalinos, policristalinos o de silicio amorfo, además de celdas de láminas delgadas a la cual pertenece el silicio amorfo, arseniuro de galio, celdas de telurio de cadmio y sulfuro de cadmio [4].

### 2.2.1 Células de silicio monocristalino.

Este tipo de células de silicio monocristalinos son actualmente las más comerciales y como su nombre lo indica es un único cristal de silicio, para comenzar con el proceso de fabricación del único cristal de silicio o célula se extraerá el silicio de la arena, para esto pasará por varias etapas debido a que en la extracción del silicio contiene impurezas, el refinado posterior pasa por fabricar el  $\text{SiHCl}_3$  (triclorosilano), que contendrá elementos indeseados, este compuesto es líquido y se lo realiza porque el líquido es más fácil de

purificar [26].

Después una vez obtenido  $\text{SiHCl}_3$  purificado, se procede a recuperar la forma sólida para esto se mezcla  $\text{SiHCl}_3$  con  $\text{H}_2$  y calentándolo se obtiene  $\text{HCl}$  y polisilicio sólido; para la obtención final del monocristal se realiza el proceso denominado Czochralski, por su descubridor Jan Czochralski, un científico polaco. El resultado es una barra circular de silicio que puede tener varias pulgadas de diámetro y medir varios metros de largo, y finalmente por un proceso de corte en el que se desperdicia mucho material se obtienen las obleas o fina capa de material semiconductor, que son con las que se fabrican las células solares de silicio monocristalino como se observa en la Figura 2.10 [26].

Este proceso requiere mucha energía y es muy costoso, pero se obtiene el cristal más eficiente con rendimientos aproximados del 15 al 18 %. Los módulos fabricados con este material tienen una garantía de hasta unos 25 años, se los puede distinguir por su color azul homogéneo o negro [4].



**Figura 2.10** Módulo formado por células de silicio monocristalino.

**Fuente:** J. C. Y. y. J. M. Lopez, «T E S I S - Instituto Politécnico Nacional,» 2009. [En línea]. Available: <http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/5641/1/ESTUDIOELECTRIFICAC.pdf>. [Último acceso: 01 04 2013].

### 2.2.2 Células de silicio policristalino.

Este tipo de células de silicio es una forma estratégica de abaratar precios, en la fabricación de obleas. Esta parte de planchas policristalinas que son obtenidas por un proceso de moldeado que a partir de pasta de silicio que está formado por varios pequeños cristales de silicio, de la cual se obtiene un sólido con pequeños cristales, una vez fundido y vertida en un molde en donde se deja asentar. Estas son rebanadas en menor espesor que las monocristalinas, presenta diferentes tonalidades de azul, son menos eficientes que las monocristalinas y su rendimiento bajo se basa en la imperfección de la estructura cristalina llegando hasta el 12 y 14 % [4].

Son cuadradas las células policristalinas por el molde, como lo muestra la Figura 2.11 donde se vierte el semiconductor fundido, y esta forma es debido a que permite un mayor compactado de las mismas dentro del panel fotovoltaico [4].



**Figura 2.11** Módulo formado por células de silicio policristalino.

**Fuente:** J. C. Y. y. J. M. Lopez, «T E S I S - Instituto Politécnico Nacional,» 2009. [En línea]. Available: <http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/5641/1/ESTUDIOELECTRIFICAC.pdf>. [Último acceso: 01 04 2013].

### **2.2.3 Células de láminas delgadas.**

Este tipo de células policristalinas en lámina delgada son aquellas que su espesor van de décimas y varias micras, formadas por microcristales agrupados que tienen como objetivo formar la lámina. El desarrollo de esta tecnología va orientada a la reducción de costos con los objetivos siguientes: encontrar materiales semiconductores en capas muy finas que puedan absorber la luz del sol, poder depositar estas capas finas en sustratos baratos como el plástico, el vidrio u otros, poder convertir la radiación en electricidad más eficientemente. Este tipo de células de capa delgada utilizan materiales tóxicos o escasos, además de su uso se ve limitado por su costo de producción [26].

#### **2.2.3.1 Células de silicio amorfo.**

El silicio amorfo es una forma no cristalina, que carece del ordenamiento de los átomos de silicio es por esto que este material no tiene propiedades semiconductoras; se debe tomar en cuenta que cuando se habla de silicio amorfo cierta cantidad de hidrógeno se incorporan al material, estos átomos de hidrógeno saturan mucho huecos de la red cristalina dejando moverse a los electrones en el silicio, permitiendo que el material resultante sea factible para la fabricación de las células con una eficiencia del 10%, en la Figura 2.12 se muestra este tipo de célula [26].

Esta se obtienen depositando sobre un sustrato de bajo costo como es el plástico, vidrio u otros similares capas delgadas de silicio, su proceso de producción es barato y simple, pero tiene inconvenientes como lo son: que sus células son afectadas en los primeros meses por un proceso de degradación, reduciendo su eficiencia y la otra es su baja conversión comparada con las células monocristalinas y policristalinas [4].



**Figura 2.12** Módulo formado por células de silicio amorfo.

**Fuente:** J. C. Y. y. J. M. Lopez, «T E S I S - Instituto Politécnico Nacional,» 2009. [En línea]. Available: <http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/5641/1/ESTUDIOELECTRIFICAC.pdf>. [Último acceso: 01 04 2013].

#### **2.2.3.2 Celdas de arseniuro de galio.**

Las células de arseniuro de galio es un material muy absorbente, es decir que pueden absorber toda la luz incidente con pocas micras de material, debido a su alto costo las células de arseniuro de galio se las utiliza en aplicaciones especiales aprovechando su alta resistencia a la radiación del sol, pero son estudiadas para sistemas de concentración [26].

Su producción a gran escala no se la realiza por el daño medioambiental que puede producir al ser tóxico el arseniuro de galio, las células multiunión son las más eficientes alcanzando valores superiores al 30% [4].

### 2.2.3.3 Células de telurio de cadmio / sulfuro de cadmio.

Presentan características parecidas a las del arseniuro de galio. Este tipo de células están compuestas por un estrato “n” de sulfuro de cadmio y un estrato “p” de telurio de cadmio, estas llegan a rendimientos medios de 8 a 10 %, aunque en el laboratorio llegan hasta 15%, su fabricación es similar a las de silicio amorfo ya que aplican diversas técnicas de deposición de materiales. La producción a gran escala no se la realiza debido a que el cadmio es altamente tóxico y puede producir un impacto medio ambiental si no es correctamente reciclado [4].

## 2.3 Eficiencia de los Paneles Solares

La eficiencia de los paneles solares depende de varios aspectos, como del tipo de célula, la posición en la que está colocado el panel solar, la temperatura a la que está expuesto el panel solar, factores climáticos reduciendo la radiación que llegará al panel solar.

### 2.3.1 Eficiencia de las células solares

La eficiencia de una célula solar depende del material con los que se realizan, algunos solo han sido probados en laboratorios por el daño medioambiental que puede producir al ser tóxico como el arseniuro de galio, en la tabla 2.1 se observaran la eficiencia dependiendo de los tipos de células vistos anteriormente.

**Tabla 2.1** Eficiencia de Diferentes Tipos de Células Solares [4]

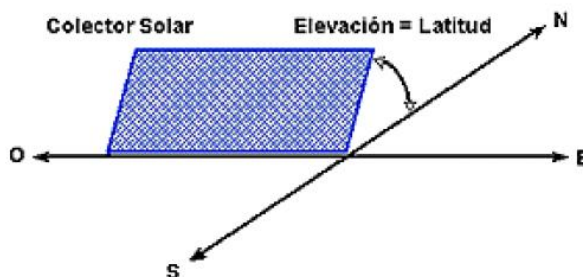
TIPO DE CÉLULAS SOLARES	EFICIENCIA
Células de silicio monocristalino	Rendimientos del 15 al 18 %
Células de silicio policristalino	Rendimientos del 12 y 14%
Células de silicio amorfo	Rendimientos del 10%
Células de arseniuro de galio	Rendimientos mayor al 30%
Células de telurio de cadmio/sulfuro de cadmio	Rendimiento del 8 a 10 %, en el laboratorio llegan hasta 15%

### 2.3.2 Eficiencia por la posición de los paneles solares

La posición es otro factor que influye al momento de aprovechar la radiación, es decir que hay que tomar en cuenta la geometría orbital para colocar el panel solar en una posición en la que capten la máxima radiación durante el recorrido del sol de este a oeste [27].

Para dicha condición hay que tomar en cuenta dos ejes de fijación que corresponden a la posición este a oeste y a la elevación, que es la inclinación con respecto al plano horizontal de la tierra [27].

Proveedores como CONERMEX recomienda que el ángulo de inclinación este orientado hacia el sur geográfico, esto debido a que el panel solar tendrá un mejor rendimiento anual, como se muestra en la figura 2.13. También hay que tomar en cuenta la latitud del lugar a montar el panel o paneles más 5 grados [5].



**Figura 2.13** Orientación de una estructura fija para maximizar la captación de radiación solar a lo largo del año.

**Fuente:** J. C. Y. y J. M. Lopez, «T E S I S - Instituto Politécnico Nacional,» 2009. [En línea]. Available: <http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/5641/1/ESTUDIOELECTRIFICAC.pdf>. [Último acceso: 01 04 2013].

Hay que tomar en cuenta las variaciones estacionales que se dan por el movimiento terrestre alrededor del sol, llegando a determinar que en invierno, el sol no alcanzará el mismo ángulo que en verano, colocando en verano en una posición más horizontal y poder aprovechar mejor la luz del sol, dejando los paneles para el sol de invierno en una posición



no óptima [5].

### **2.3.3 Eficiencia por la temperatura de los paneles solares**

La eficiencia de una célula solar fotovoltaica dependen mucho de la temperatura, ya que un aumento de temperatura en la célula solar supone un incremento de corriente y una disminución de la tensión, por lo que la eficiencia del panel disminuye al disminuir la potencia [28].

Una solución que se le ha dado a este problema es la creación de paneles solares híbridos, que es la unión de la energía solar fotovoltaica y solar térmica en un solo panel. Es el transferir el exceso de calor de las células solares fotovoltaicos a un absorbedor que calienta un fluido, como lo vimos en la energía solar térmica [28].

Las condiciones estándar en un módulo solar son una irradiación de  $1\text{Kw/m}^2$ , y una temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , según los datos de placa, pero en la realidad esto no se da, afectando a la potencia y la corriente en forma proporcional, pero no al voltaje considerablemente [7].

Mientras la temperatura afecta la potencia y el voltaje pero el efecto es menor, la reducción de voltaje y potencia es aproximadamente del 0.5% por cada grado Celsius mayor a  $25^\circ\text{C}$ . Normalmente la temperatura a la que operan los módulos fotovoltaicos es alrededor de  $55^\circ\text{C}$  por lo que produciría 85% de la potencia nominal a plena irradiancia es decir:  $0.5\% \times (55^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 15\%$  [7].

## **2.4 Impacto Ambiental**

### **2.4.1 Impacto ambiental de la energía solar fotovoltaica**

Los sistemas fotovoltaicos son respetuosos con el medio ambiente, en condiciones de operación normales, en su funcionamiento normal no se genera emisiones de CO<sub>2</sub>, evitando contaminaciones al aire o al agua como lo hacen otras formas de generación eléctrica convencionales, pero la generación de energía solar fotovoltaica genera impacto ambiental en la fabricación de las células se puede producir contaminación con el Cd y Se [29].

El impacto medioambiental que produciría la energía solar fotovoltaico son:

- Contaminación.
- Utilización de terreno.
- Impacto visual.
- Impacto sobre la flora y fauna.

#### **2.4.1.1 Contaminación**

La fabricación de las células solares se las realiza con silicio, sabiendo que es abundante y que para su fabricación no se requiere cantidades significativas, es por esto que en su fabricación no se altera las características litológicas y topográficas del terreno. Depende de la tecnología a utilizar en la fabricación para saber si produce contaminación [4].

Hay que tomar en cuenta la vida útil del panel solar debido a que pueden producir gases tóxicos si se quema, para evitar esto deben ser reciclados convenientemente, además hay que tomar en cuenta las baterías de la instalación fotovoltaica, ya que deben ser tratadas debido al ácido que contienen y que son peligrosos [4].

#### **2.4.1.2 Utilización de terreno**

El impacto medioambiental que produciría la energía solar fotovoltaico por la necesidad de terreno depende del tipo de instalación que se realice: centralizada o descentralizada.

Las instalaciones descentralizadas son las que aprovechan tejados, fachadas o terrazas de edificios a las que se va a suministrar la energía generada, es decir que la necesidad de terrenos es cero [4].

Las instalaciones centralizadas estas si ocupan gran cantidad de espacio que depende de la capacidad de la instalación, de la eficiencia de los generadores fotovoltaicos, pero estas no inciden sobre las características físico-químicas del suelo, esto debido a que no producen ni contaminantes, ni vertidos, ni movimientos de tierra [4].

#### **2.4.1.3 Impacto Visual**

Al igual en la utilización de terreno, el impacto depende del tipo de instalación a realizarse, en el caso de la instalación descentralizada, el impacto visual que pueden producir los paneles solares se minimizan al saber que estas instalaciones pueden ir en las tejas o fachadas, haciéndolas pasar desapercibidas, además al tratarse de sistemas autónomos se tiene como ventaja que no necesita de postes ni tampoco de líneas eléctricas, evitando alterar el paisaje.

Las instalaciones centralizadas al ser un sistema fotovoltaico de gran tamaño va a tener un impacto visual grande, el problema principal se da por las superficies reflejantes, que al estar orientadas de una forma que el reflejo sea molesto o peligro, como pueden ser zonas habitables o carreteras. Para eliminar este impacto visual se procede a plantar árboles entre los paneles y los puntos de observación, cuidando que no produzcan sombras en las instalaciones [4].

#### **2.4.1.4 Impacto sobre la flora y fauna**

El impacto medioambiental que produciría la energía solar fotovoltaico sobre la flora y fauna, es nula, el único impacto es la ocupación de suelo. Al ser silencioso y no causar ruidos ni vibraciones no molestan a los animales, se podría causar ruido solo en el montaje de los sistemas fotovoltaicos [4].

Se podría argumentar que se puede modificar el microclima local, al decir los paneles solares evitan que la radiación llegue al medio ambiente circundante, pero solo el 10% de la energía solar incidente por unidad de tiempo sobre la superficie del sistema fotovoltaico es transformada y transferida, el resto es transferida a través de los módulos o es reflejada [4]

## **CAPÍTULO III**

### **ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN DIFUSA**

El punto de partida del presente capítulo son los factores naturales que inciden sobre un panel solar, entre los cuales tenemos la contaminación ambiental, posición del sol, generación de sombras, temperatura y las condiciones climáticas, siendo la condición climática el factor más importante que incide sobre el panel, ya que un día nublado disminuye la eficiencia del panel fotovoltaico. La medición del recurso solar se la realizó tomando valores de voltaje del panel solar instalado en la Universidad Politécnica Salesiana, la toma de valores se lo realizó en Labview, mediante un sistema de adquisición de datos, los valores registrados se los analizó para poder observar el comportamiento del panel solar fotovoltaico policristalino, al igual que nos permitió comprobar los valores medidos con los valores calculados, para lo cual se realizó un modelado matemático en Matlab, el modelamiento se lo realizó en base a la ecuación de Wolf Zissis, pero se tomarán algunas expresiones exactas, que se ajustarán mediante funciones paramétricas.

#### **3.1 Factores Naturales que Inciden en un Panel Solar**

Hay varios factores naturales que inciden sobre un panel solar, siendo la temperatura un factor natural que afecta a la potencia ya que un aumento de temperatura en el panel solar supone una disminución de la tensión, por lo que la potencia disminuye [28]. La potencia presenta una pérdida del orden de un 4% por cada 10 °C de aumento de su temperatura nominal o de operación [25]. Entre otros factores naturales que inciden sobre un panel solar tenemos: la contaminación ambiental a la que está expuesta, condiciones climáticas, posición del sol y la generación de sombras, que las describiremos a continuación.

### **3.1.1 Contaminación ambiental**

Uno de los factores naturales que inciden en un panel solar es la contaminación ambiental a la que están expuestas, por efecto de contaminantes como el polvo y suciedad (como lo puede ser excremento de aves) que pueden acumularse en los módulos, disminuyendo el rendimiento del panel solar, lo que disminuiría la potencia de generación, la suciedad daría lugar a pérdidas de energía por puntos calientes [25].

#### **3.1.1.1 Mantenimiento de los Paneles**

Para evitar la contaminación ambiental a la que está expuesta un panel solar, se debe proceder con un mantenimiento preventivo adecuado, la lluvia elimina la posibilidad de realizarlo muy frecuentemente, en caso de ser necesario se lo realizará utilizando un detergente no abrasivo con agua se lo debe realizar en horas en las que el sol no incide sobre los paneles, hay que hacer una inspección general unas dos veces al año en las que se revisarán las conexiones entre los paneles [4].

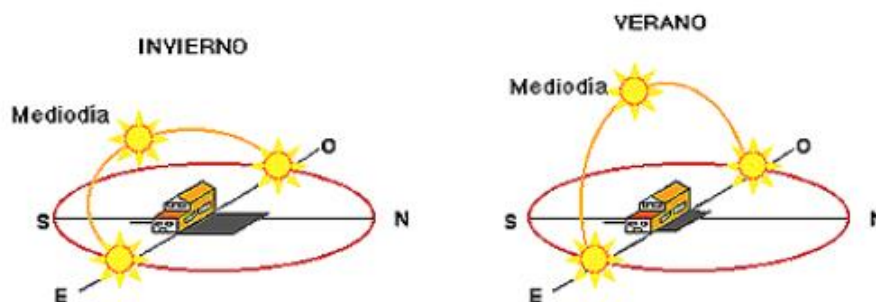
### **3.1.2 Condiciones climáticas**

Las condiciones climáticas es uno de los factores naturales que inciden en un panel solar, como se saben los paneles solares fotovoltaicos generan electricidad incluso en días nublados, aunque su rendimiento disminuye. La producción de electricidad varía directamente a la luz que incide sobre el panel; un día totalmente nublado equivale aproximadamente a un diez por ciento de la intensidad total del sol, y el rendimiento del panel disminuye proporcionalmente a este valor [30]. La nubosidad es un factor de la radiación difusa que es el cambio en la dirección de un rayo de luz cuando este no logra traspasar la interfaz entre dos medios y refracción solar en la atmósfera que es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio material a otro, en las nubes, y el resto de elementos atmosféricos y terrestres, en este tipo de radiación no es posible concentrar la luz difusa que proviene de todas direcciones [30].

El cuerpo negro es una superficie ideal con la cual evaluamos las propiedades radiantes de superficies reales, el cuerpo negro absorbe la radiación incidente sobre él, por lo que es un absorbedor ideal, en otras palabras es un emisor difuso por lo que sus emisiones ocurren en todas las direcciones uniformemente [31].

### 3.1.3 Posición del sol

Otro factor natural que incide sobre un panel solar es la posición del sol, para lo que necesitamos saber que la tierra gira alrededor del sol (movimiento de traslación) dando lugar a las estaciones del año, al igual que la tierra gira alrededor de su propio eje (movimiento de rotación) por lo que tenemos el día y la noche, la importancia de la posición del sol se da por la necesidad de mantener el modulo lo más directamente apuntado al sol, lo que permite recibir la máxima insolación y mejor rendimiento [5]. La posición del sol puede determinarse por coordenadas ecuatoriales que son la declinación y el ángulo horario vistos anteriormente o mediante coordenadas horizontales: ángulo acimutal y altura sobre el horizonte o su complementario el ángulo cenital [32]. En invierno el ángulo del sol no será el mismo que en verano, como se observa en la Figura 3.1, esto se da por el aparente movimiento del sol, por esta razón es que los paneles solares se los colocará un poco más horizontal en verano, que en invierno [5].



**Figura 3.1** *Movimiento aparente del sol según la época del año*

**Fuente:** J. C. Y. y J. M. Lopez, «T E S I S - Instituto Politécnico Nacional,» 2009. [En línea].

Available:<http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/5641/1/ESTUDIOELECTRIFICAC.pdf>. [Ú

ltimo acceso: 01 04 2013] .

### 3.1.4 Generación de sombras

La generación de sombras es otro de los factores naturales que inciden en un panel solar ya que afectan al rendimiento de los paneles solares, en algunas instalaciones fotovoltaicas es inevitable la presencia de sombras a ciertas horas del día provocando una disminución de la captación de la radiación solar, lo que nos genera pérdidas de energía [25]. En instalaciones de paneles conectadas en serie es más notorio debido a que si un panel esta con sombras no genera los mismo niveles que los demás paneles, por lo que en vez de generar, consumirá energía, por lo que en el diseño se deberá situar a los paneles solares en lugares en los que no se vean afectados por dichas sombras [33].

## 3.2 Medición del recurso solar

### 3.2.1 Medición por el método voltímetro - amperímetro

La medición del recurso solar se la realizó con el método voltímetro-amperímetro, para esto se deberá tener en cuenta los datos de placa del panel fotovoltaico que se los observa en la Tabla 3.1, este método consiste en tomar los valores de voltaje y corriente que genera el panel solar a lo largo del día, y se resolverá mediante una regla de tres que se relacionará con el voltaje pico y la irradiancia de placa, así se podrá encontrar la irradiancia al nivel de voltaje que genera el panel fotovoltaico.

**Tabla 3.1** Características del panel solar fotovoltaico [Ficha Técnica del Panel]

MODEL	KC85T		
IRRADIANCE	1000 Wm <sup>-2</sup>	800 Wm <sup>-2</sup>	MAXIMUM SYSTEM VOLTAGE
AND CELL	AM 1.5	AM 1.5	
TEMPERATURE	25°C	47°C	
Pmax	87W	62W	
Vpmax	17.4V	15.3V	600V
Ipmax	5.02A	4.06A	MASS 8.3 Kg
VDC	21.7V		
Isc	5.34A		



Mediante una plataforma informática elaborada para adquirir los datos proporcionados por el panel fotovoltaico, para lo que se utilizó una tarjeta de adquisición de datos (DAQ), la cual me permitirá interactuar con el mundo real del PC a otros aparatos, ya que estas tienen entradas y salidas de datos [34].

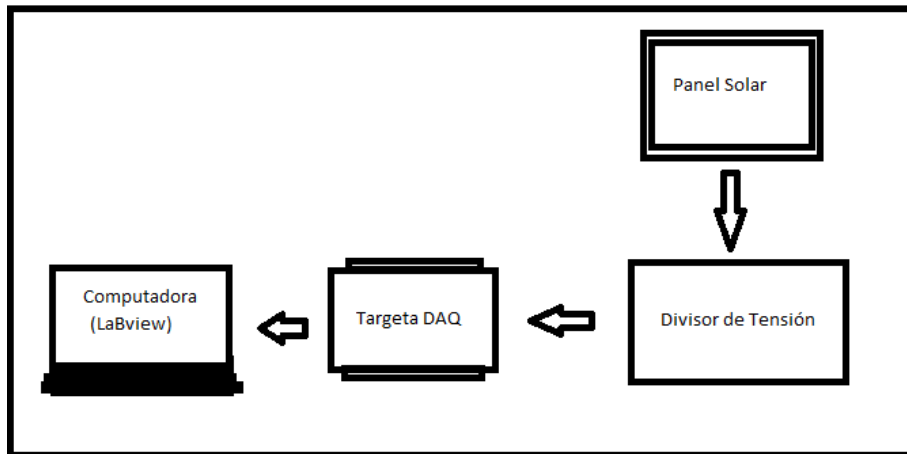
La tarjeta de adquisición de datos (DAQ) que se utilizó es la NI USB 6212, en la Figura 3.2 se la puede observar, esta consta de 16 entradas analógicas, 2 salidas analógicas, 32 entradas y salidas digitales, esta energizado por un bus USB para una mejor conectividad, y es compatible con Labview, el software que utilizamos para el registro de datos es el NI-DAQmx [35].



**Figura 3.2** DAQ NI USB 6212

**Fuente:** National Instrument, «National Instrument,» [En línea]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/207096>. [Último acceso: 08 08 2014] .

En la Figura 3.3 se observa el proceso que se utilizó para la medición del recurso solar, que comienza en el panel solar el que nos proporcionará el voltaje, pasando a un circuito de acoplamiento de datos que mandará la señal a la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) el cual se comunicará con nuestra software que es Labview. El circuito de acoplamiento de datos es un divisor de tensión realizado para la reducción del voltaje, tomado en cuenta que el nivel máximo y mínimo de la señal analógica que la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) puede digitalizar, van en un rango de (0Vdc a 5Vdc) [35].



**Figura 3.3** *Proceso de la medición del recurso solar*

**Fuente:** *[Propia del autor]*

El panel solar que se utilizó para la medición es el que está instalado en la terraza del laboratorio de Investigación de la Universidad Politécnica Salesiana y se lo puede observar en la Figura 3.4, la medición tuvo una duración de un mes que comenzó desde el 13 de febrero hasta el 18 de marzo del 2014.

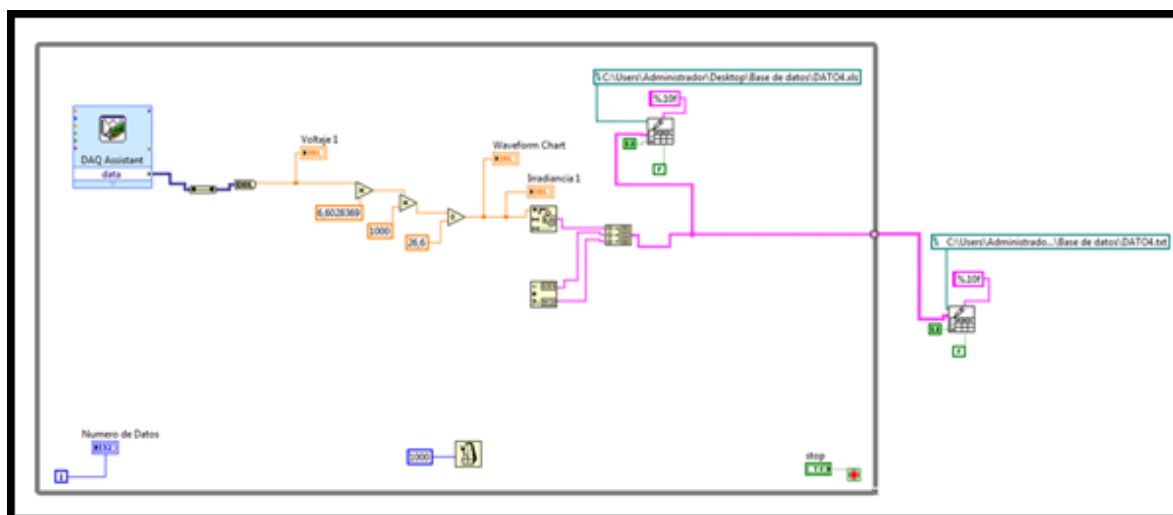


**Figura 3.4** *Panel Solar instalado en la Universidad Politécnica Salesiana*

**Fuente:** *[Propia del autor]*

La plataforma informática utilizada es Labview que es un lenguaje de programación gráfico utilizada para diversas aplicaciones como la resolución de algoritmos. Con ayuda de esta plataforma informática se realizó el registro de los valores de voltaje. El registro se lo realizó en Excel y un archivo de respaldo en Txt, para esto se utilizaron las herramientas de Labview como los ficheros Spreadsheet que son ficheros de texto que crean archivos de texto, al igual que leen archivos de texto, esta herramienta creo los archivos de texto en Excel y un respaldo en Txt para el registro del voltaje, como se observa en la Figura 3.5, en la cual nos muestra la programación en la plataforma informática.

Otras función utilizada fue el Get Date / Time String Function, esta función permite convertir un valor numérico de la hora y la fecha en un string, registrando el valor de la hora y la fecha en los archivos creados, obteniendo así un registro más ordenado. En la plataforma informática se obtendrán los valores en  $\text{w/m}^2$ , por medio del método voltímetro-amperímetro, el programa se detendrá con un botón de stop (booleano) [34].



**Figura 3.5** Programación en Labview para el registro de voltaje en archivo TXT y EXCEL.

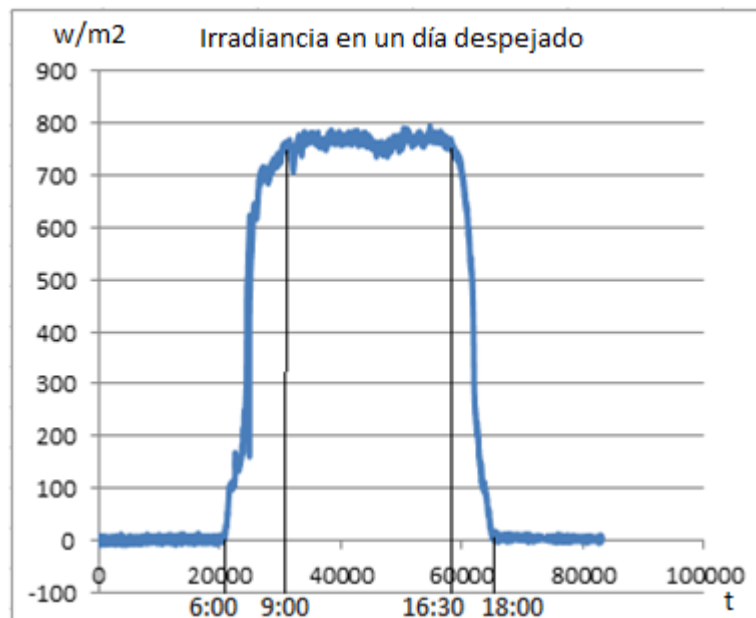
**Fuente:** [Propia del autor]

### 3.3 Análisis del comportamiento del panel solar fotovoltaico policristalino

En base a la medición del recurso solar realizado con el método voltímetro-amperímetro, registrados en la plataforma informática de los voltajes medidos del panel solar visto anteriormente, se analizó el comportamiento en días despejados y en días nublados, esto permitió observar los cambios en las curvas del comportamiento del panel.

#### 3.3.1 Comportamiento en un día despejado

Para el análisis del comportamiento de los paneles solares en un día despejado se tomarán los datos medidos el 12 de marzo del 2014, este día fue elegido por ser uno de los días más despejados, en la Figura 3.6 se puede observar la irradiancia a lo largo del día, los datos tomados fueron desde las 0:00 am hasta las 23:59 como lo vemos en Anexo 1, en la curva se observa que en las primeras horas de la mañana la irradiancia es cero, aumentando a partir de las 6:00 am, hora en la que el panel comienza a recibir irradiancia, como se observa este día estuvo despejado se lo nota por la curva ya que no tiene alteraciones muy notorias en las horas de mayor generación que son al medio día.

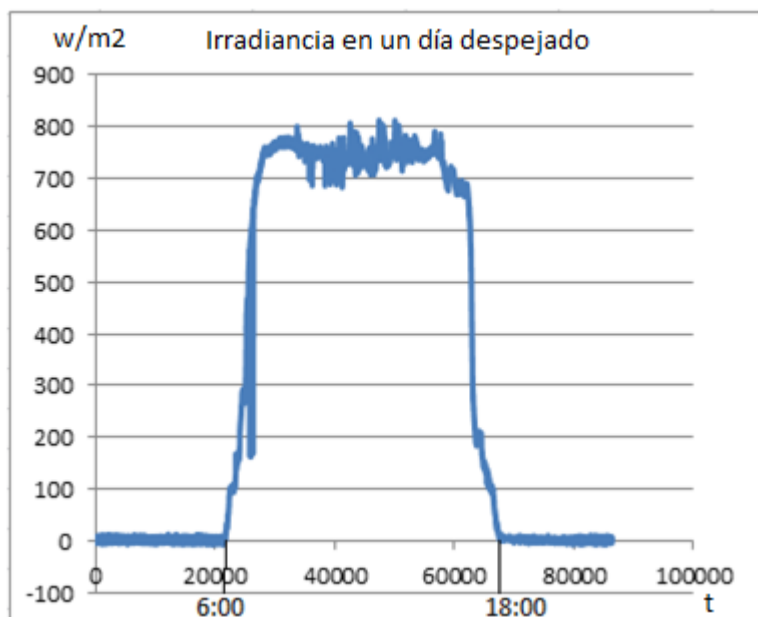


**Figura 3.6** Curva de la irradiancia medido en un día despejado

**Fuente:** [Propio del autor]

La medición se la realizó cada segundo, consiguiendo al día 84000 medidas, por lo que no tiene mucho margen de error, en la curva se observa que la mayor generación de irradiancia se obtiene entre las 10:00 y 15:00, variando en un rango muy pequeño, mientras que en la tarde comienza a bajar la irradiancia a partir de las 16:30 hasta las 18:00 en las que la irradiancia cae a cero.

A continuación se analizó el comportamiento del panel solar en un día despejado, pero con algunas alteraciones mayores a las que se observó en la curva anterior, para esto se tomaron los datos medidos el 16 de febrero del 2014, en la Figura 3.7, se puede apreciar la curva de irradiancia con algunas variaciones, pero con un comportamiento similar al anterior, en las primeras horas de la mañana la irradiancia es cero, aumentando a partir de las 6:00 am, lo que se saca de conclusión es que el día estuvo con poca sombra por lo que las alteraciones no son mayores.



**Figura 3.7** Curva de la irradiancia medido en un día despejado con pequeñas variaciones

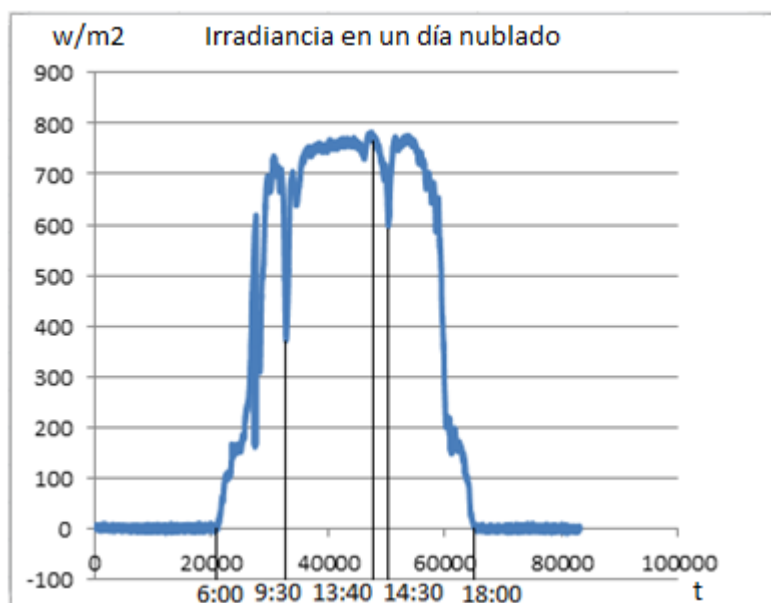
**Fuente:** [Propia del autor]

En la curva se observa la variación que existe debido, a las sombras de muy corta duración que se presentaron a lo largo del día, lo que generó la disminución de irradiancia.

Los datos tomados para la Figura 3.7, se observarán en el Anexo 2.

### 3.3.2 Comportamiento en un día nublado

El comportamiento de los paneles solares en un día nublado a diferencia del resultado obtenido en un día despejado, genera la disminución considerable de la irradiancia, lo que determina la disminución de generación de electricidad, en base a los datos que se registró, se observa el comportamiento en un día nublado, para lo que tomó los datos medidos el 09 de marzo del 2014, este día fue escogido por ser un día nublado, como se lo mira en la Figura 3.8. En la Figura 3.8 se puede observar la irradiancia a lo largo del día, los datos tomados fueron desde las 0:00 am hasta las 23:59 como lo vemos en Anexo 3, en la curva se observa que en las primeras horas de la mañana la irradiancia es cero, aumentando a partir de las 6:00 am, como se observa fue un día nublado por las alteraciones en la irradiancia, que en momentos bajan de 730 w/m<sup>2</sup>, hasta 370 w/m<sup>2</sup>, a diferencia de un día despejado en la que la irradiancia se mantiene y no genera muy altas variaciones.



**Figura 3.8** Curva de la irradiancia medido en un día nublado

**Fuente:** [Propio del autor]

### 3.4 Modelación Matemática

#### 3.4.1 Modelización del promedio diario mensual de la radiación difusa

Se realizó el modelamiento en base a parámetros conocidos, como lo son la latitud, la longitud y la altitud, del lugar en el que se hace la medición, más adelante se expondrá tales valores. La constante solar es otro parámetro conocido que está expuesto en la ecuación (1.3), que se ha determinado de datos experimentales.

Para el modelamiento se calculó la declinación con la ecuación (1.6), esto para tener un registro de todos los días, ya que esta fórmula depende de la variable (z), que como se explicó en el capítulo 1, representa el número de días del año (para el 1 de enero  $z = 1$  y para el 31 de diciembre,  $z = 365$ ). El ángulo horario al ocaso ( $w_c$ ) se lo calcula mediante la ecuación (3.1), que depende de la declinación y la latitud [13].

$$\cos(w_c) = -\tan(\varphi) * \tan(\delta) \quad (3.1)$$

Para el cálculo de la radiación solar total extraterrestre en una superficie horizontal (G), se lo calculó con la ecuación (3.2) de Duffie y Beckman, la cual viene dada en joule por metros cuadrados, es conveniente para aplicaciones eléctricas convertirlas en Kwh/m<sup>2</sup>, en la figura se puede observar la radiación solar extraterrestre a lo largo del año [13].

$$H_o = \frac{2 * G_{sc}}{\pi} * (1 + 0.033 * \cos(\frac{360 * z}{365})) * (\cos\varphi * \cos\delta * \sin\omega + (\frac{\pi * \omega}{180}) * \sin\varphi * \sin\delta) \quad (3.2)$$

Los parámetros de la ecuación (3.1) y (3.2), están definidos en el capítulo 1, en las diversas ecuaciones expuestas.

Angstrom realizó una ecuación de regresión, la que estima la radiación incidente promedio diaria en un mes en un plano horizontal (H), con la radiación promedio diario de un día claro sin nubosidad de dicho mes ( $H_c$ ) como se observa en la ecuación (3.3) [36].

$$\frac{H}{H_c} = (a + b(\frac{n}{N})) \quad (3.3)$$

Dónde:

$a$  y  $b$ : constantes empíricas.

$n$ : horas de sol promedio diarias del mes.

$N$ : máximo de horas de sol en un día del mes.

Page desarrolló otra ecuación por el problema que se tiene de interpretación de un día claro ( $H_c$ ), la ecuación es similar a la de Angstrom, en la cual sustituyen  $H_c$  por la radiación extraterrestre como se observa en la ecuación (3.4) [36].

$$\frac{H}{H_o} = (a + b(\frac{n}{N})) \quad (3.4)$$

Las constantes ( $a$  y  $b$ ) se determinan a través de una comparación con datos históricos o regresión, se puede ajustar estas constantes. Por motivos de interpretación de “ $n$ ” y “ $N$ ” proporcionando datos erróneos, la relación  $n/N$  se lo puede contemplar en la constante  $b$  y la sumatoria de  $a$  y  $b$  se simplifican en la constante total  $K_t$  como se lo observa en la ecuación (3.5) [36].

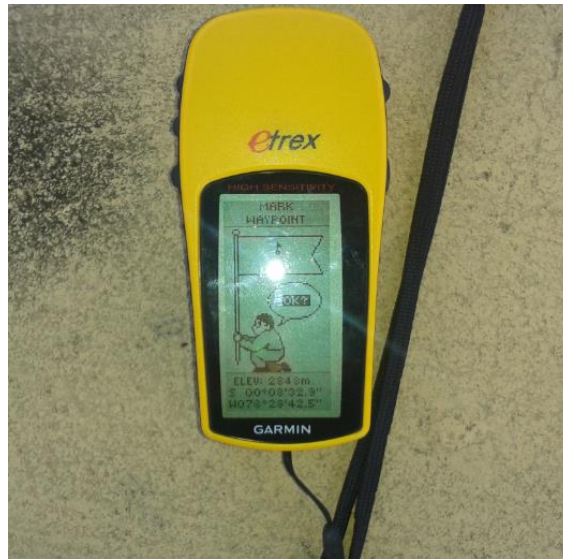
$$\frac{H}{H_o} = K_t \quad (3.5)$$

A partir del índice de claridad ( $K_t$ ), se calculó la radiación global solar ( $H$ ), en base a un estudio realizado para el DMQ (Distrito Metropolitano De Quito), basándose en registros históricos de estaciones de la secretaria del ambiente y de la EPMAPS (Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento), se comprobó que el índice de claridad más óptimo se lo calcula mediante la ecuación (3.6) [36].

$$K_t = -8.22 - 0.1151 * longitud - 0.0001137 * altura \quad (3.6)$$



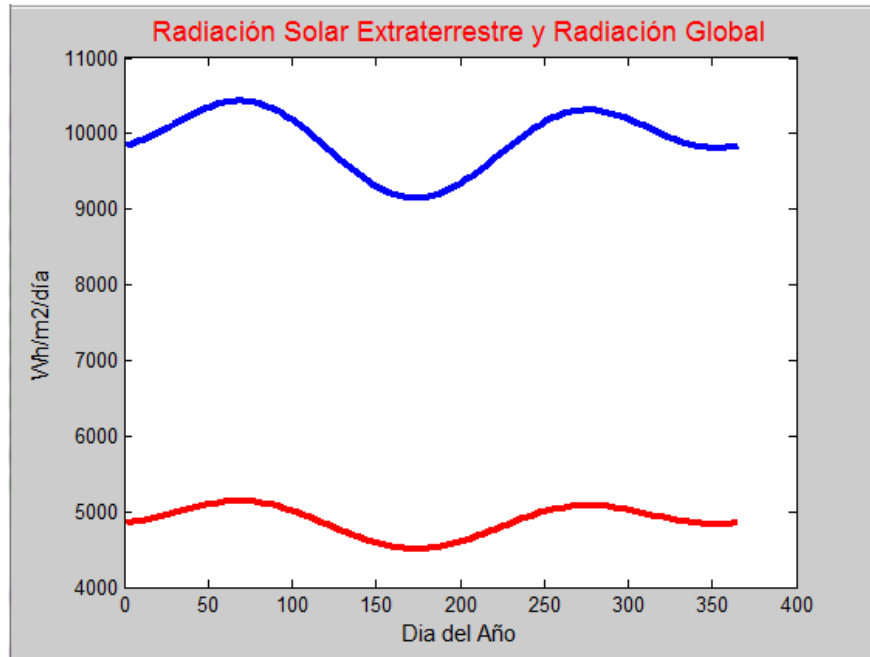
El índice de claridad ( $K_t$ ), como se observa depende de la longitud y altura del lugar, el lugar escogido para tomar los datos fue el colegio San Gabriel de Quito, estos datos fueron tomados en el lugar con ayuda de un GPS como se puede observar en la Figura 3.9, los datos obtenidos fueron los siguientes: Latitud:  $0^{\circ} 11' 08.17''$ , Longitud:  $78^{\circ} 29' 48.04''$ , Altura: 2835.



**Figura 3.9** GPS utilizado para medir la longitud, latitud y altura

**Fuente:** *[Propio del autor]*

En la Figura 3.10, se puede observar la radiación solar extraterrestre y la radiación solar global a partir de las ecuaciones expuestas, a lo largo del año, el modelamiento realizado en Matlab se lo realizó en base a los datos de latitud, longitud y altura expuestos anteriormente se lo puede observar en el Anexo 4. En la figura 3.10, la radiación solar extraterrestre está en línea azul, mientras que la radiación global está en línea roja.



**Figura 3.10** Curva de la radiación extraterrestre vs la radiación global a lo largo del año

**Fuente:** [Propio del autor]

En base a diferentes estudios realizados se ha demostrado que la radiación difusa está en función al índice de claridad ( $K_t$ ), hay que tomar en cuenta que este parámetro difiere con las distintas estaciones del año [37].

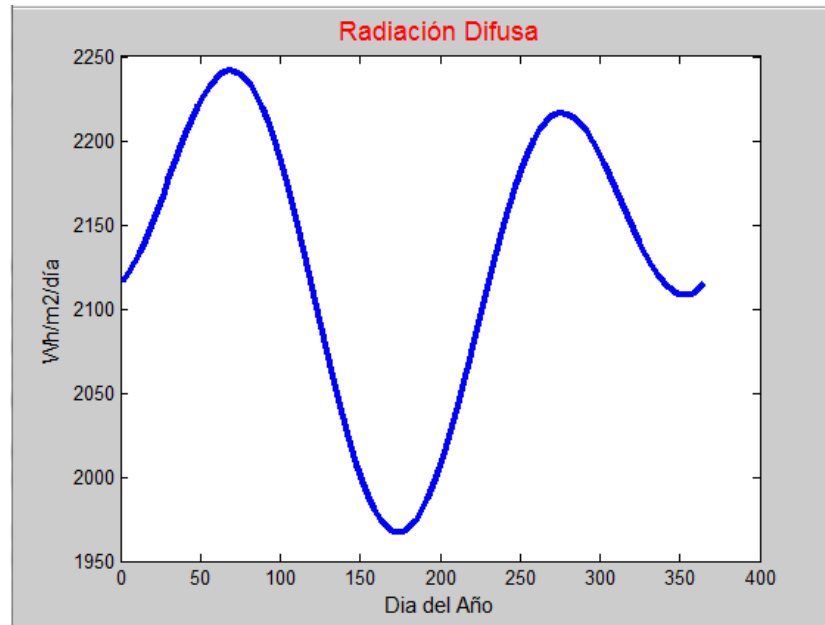
Para ángulos horarios al ocaso ( $\omega_c$ ) menores a  $81.4^\circ$  de puesta de sol y  $0.3 \leq K_t \leq 0.8$ , se los relaciona con la ecuación (3.7), la cual depende del índice de claridad y de la radiación global [37].

$$H_d(1) = (1.311 - 3.022 * K_t + 3.427 * K_t^2 - 1.821 * K_t^3) * H \quad (3.7)$$

Para ángulos horarios al ocaso ( $\omega_c$ ) mayores a  $81.4^\circ$  de puesta de sol y  $0.3 \leq K_t \leq 0.8$ , se los relaciona con la ecuación (3.8), la cual depende del índice de claridad y de la radiación global [37].

$$H_d(2) = (1.391 - 3.56 * K_t + 4.189 * K_t^2 - 2.137 * K_t^3) * H \quad (3.8)$$

Para la modelización de la radiación difusa para valores diarios mensuales se lo calculará en base a la ecuación (3.7), por la razón que el ángulo horario al ocaso ( $w_c$ ) es menor a  $81.4^\circ$ , en la Figura 3.11 se puede observar el comportamiento de la radiación difusa diaria mensual para los días del año. Los datos obtenidos con la ecuación (3.7), se los analizó en el capítulo 4, con datos obtenidos en la página de la nasa la cual es: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov> [38].



**Figura 3.11** Curva de la radiación difusa diaria mensual para los días del año

**Fuente:** [Propio del autor]

Para la modelización de la radiación difusa para valores diarios mensuales realizado en Matlab se analizó varias ecuaciones, en el anexo 5 se puede observar el script para realizar la Figura 3.11, los datos ingresados para la modelación fueron los mismos ingresados para el anexo 4.

### **3.4.2 Modelización de la radiación difusa en el plano horizontal a lo largo de días claros**

Por la importancia de saber la estimación de la radiación horaria autores como Liu y Jordan, Hottel y Whiller, relacionaron la radiación diaria media mensual y la radiación horaria media mensual que dependen de la hora en cuestión y la duración del día, su aproximación es alta en días despejados no así en días cubiertos, por tal razón no es muy aplicable [39].

El modelamiento se lo realizó en Matlab para el día 31 de mayo, este día se escogió por motivo que no se encontró un día claro, en las medidas de la radiación difusa proporcionado por el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER), por tal motivo no se realizó una comparación y verificación el modelo. Para este modelo se necesitó algunos datos de entrada entre los cuales tenemos la constante solar ( $G_{sc}$ ), el valor que se tomará es determinado por datos experimentales, este valor se lo vio en la ecuación (1.3), la declinación expuesta en la ecuación (1.6), ( $z$ ) que representa el número de días del año.

Otros valores necesarios son la latitud ( $\phi$ ), longitud ( $Ll$ ) y la altura, estos valores se los tomará del sitio en el que se encuentre hecha la medición, para nuestro caso es en la ESPOCH, los valores se los tomó con ayuda de Google Eart. El valor de la latitud una vez transformado en grados es igual a: -1,65546 y el valor de la altitud es: 2828m.

Para el modelo matemático es necesaria la hora solar, a partir de la hora civil, para lo que se necesita la longitud del meridiano medio de huso horario adoptado ( $L_s$ ) para esto se tomó en cuenta los husos horarios (permiten que lugares cercanos tengan horas iguales, sabiendo que la rotación de la tierra tiene una velocidad angular de  $15^\circ$  por hora), para el Ecuador el UTC (tiempo universal coordinado) es -5, por lo que se puede decir que ( $L_s$ ) para el Ecuador será:  $-75^\circ$ . Teniendo en cuenta lo expuesto se puede decir que el tiempo solar verdadera ( $T_{vs}$ ) se lo calcula con la ecuación (3.9) [1].

$$Tvs = HO - e + Et + \frac{Ls - Ll}{15} \quad (3.9)$$

Dónde:

*HO*: El tiempo oficial del país

*Ls*: La longitud del meridiano medio de huso horario adoptado

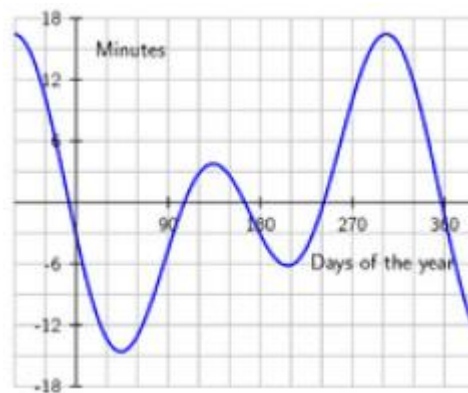
*Ll*: Es la longitud del meridiano que pasa por el punto estudiado

*Et*: Es la ecuación de tiempo

*e*: Es el adelanto respecto de la hora civil

La longitud del meridiano medio de huso horario adoptado (*Ls*) en nuestro caso será -75, mientras que la longitud del meridiano que pasa por el punto estudiado (*Ll*) medida en el lugar que se encuentra el aparato de medición es: -78,681109 [40].

La ecuación de tiempo (*Et*) es la diferencia entre el tiempo solar verdadero y el tiempo solar medio, esta diferencia varía a lo largo del año, como se observa en la Figura 3.12 [12].



**Figura 3.12** Curva de la ecuación del tiempo a lo largo del año

**Fuente:** E. Sierra, «Documento pdf,» 01 11 2010. [En línea]. Available:

[http://www.fing.edu.uy/if/solar/proyectos/SOLARIMETRIA\\_E.Sierra\\_.pdf](http://www.fing.edu.uy/if/solar/proyectos/SOLARIMETRIA_E.Sierra_.pdf). [Último acceso: 31 10 2013]

Whillier, planteó la ecuación de tiempo (*Et*), corrección necesaria debido a que el sol se adelante y se atrasa respecto a la hora solar media, esto se da por la excentricidad de la órbita terrestre, la ecuación de tiempo (*Et*) se lo calcula con la ecuación (3.10) [1].

$$Et = 9,87 * \text{sen}(2B) - 7,53 * \text{cos}(B) - 1,5 * \text{sen}(B) \quad (3.10)$$

Donde B se calcula en la ecuación (3.11)

$$B = \left(\frac{360}{364}\right) * (z - 81) \quad (3.11)$$

Teniendo el tiempo solar verdadero podemos calcular el ángulo horario (w), que lo calcularemos con la ecuación (3.12) [1].

$$w = (15) * (Tvs - 12) \quad (3.12)$$

En base a estudios estadísticos podemos considerar la irradiancia horaria media mensual (I), energía incidente por unidad de superficie horizontal y se puede establecer la ecuación (3.13) [39].

$$I = Ib + Id \quad (3.13)$$

Dónde:

*Ib*: irradiancia directa horaria media mensual.

*Id*: irradiancia difusa horaria media mensual.

En base a la ecuación (1.12) de la radiación solar difusa sobre un plano horizontal, se puede establecer la ecuación (3.14) [39].

$$H = Hb + Hd \quad (3.14)$$

Liu y Jordan, Collares – Pereira y Rabl, basándose en estudios estadísticos en varias localidades de la distribución horaria, desarrollaron correlaciones analíticas, en función del día, la hora y la longitud. De tal manera que con la ecuación (3.15), se lo define el factor (rg) [39].

$$I = \frac{rg}{H} \quad (3.15)$$

El factor (rg), es la razón entre la irradiancia global horaria (I) y la irradiancia global diaria (H), calculada por la ecuación (3.5), el factor (rg) lo podemos calcular por medio de la ecuación (3.16) [41].

$$rg = \frac{\pi}{24}(a + b)(\cos(w) - \cos(ws))/(\sin(wc) - \left(\pi * \frac{wc}{180}\right) * \cos(wc)) \quad (3.16)$$

Dónde:

$w$ : ángulo horario calculada en la ecuación 3.12.

$wc$ : ángulo horario al ocaso calculada en la ecuación 3.1.

$a$  y  $b$ : coeficientes que están definidos por las ecuaciones:

$$a = 0.409 + 0.5016 * \sin(wc - 60) \quad (3.17)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 * \sin(wc - 60) \quad (3.18)$$

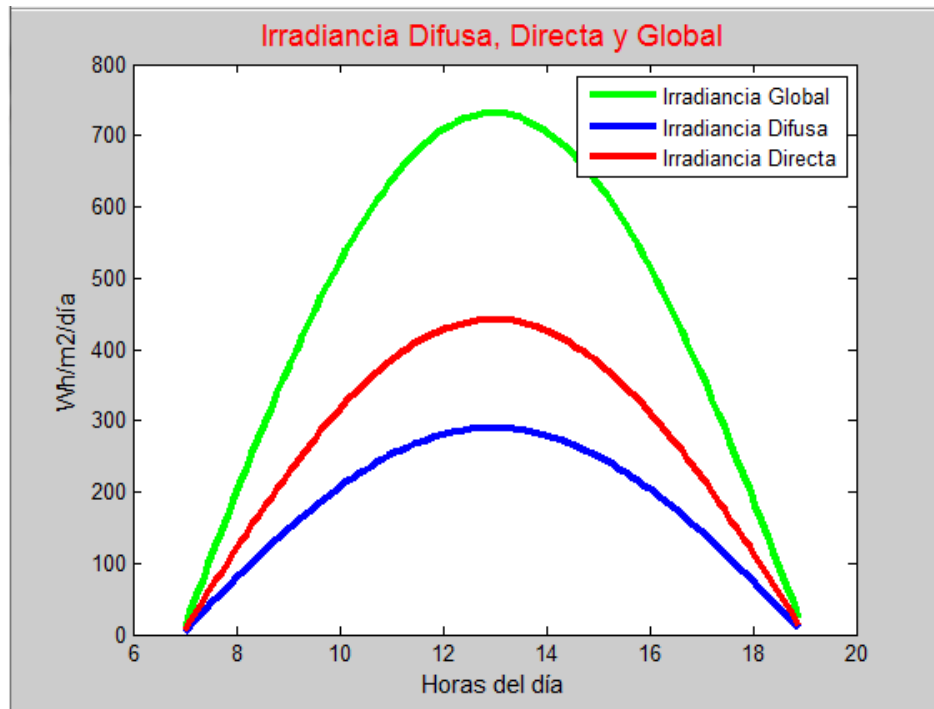
Los coeficientes  $a$  y  $b$  calculadas mediante las ecuaciones (3.17) y (3.18), están definidas por el ángulo horario al ocaso. También se puede calcular el factor ( $rd$ ), que es la razón entre la irradiancia difusa diaria ( $H_d$ ) y la irradiancia difusa horaria ( $I_d$ ), definida por la ecuación (3.19) [41].

$$I_d = \frac{rd}{H_d} \quad (3.19)$$

El factor ( $rd$ ) es calculado mediante la ecuación (3.20), la cual depende de dos factores que son el ángulo horario al ocaso ( $wc$ ) y el ángulo horario ( $w$ ) [41].

$$rd = \frac{\pi}{24}(\cos(w) - \cos(wc))/(\sin(wc) - \left(\pi * \frac{wc}{180}\right) * \cos(wc)) \quad (3.20)$$

Resumiendo para el cálculo de la irradiancia difusa para valores horarios mensuales se lo calculará en base a la ecuación (3.19), con ayuda de las ecuaciones (3.20) y (3.7), en la Figura 3.13 se puede observar el comportamiento de la irradiancia difusa horaria mensual para los datos anteriormente dichos. En el Anexo 6, se observa el modelo matemático en Matlab, para un día claro.



**Figura 3.13** Curva de la irradiancia directa, difusa y global horaria para las horas del día

**Fuente:** *[Propio del autor]*

### 3.4.3 Modelización de la radiación difusa en el plano horizontal a lo largo de día

Otro modelo matemático se lo realizó en base a estudios realizados por Wolf Zissis, pero se tomarán algunas expresiones exactas, para ajustarlas mediante funciones paramétricas (Iqbal, Bird y Riordan), es decir que estarán determinadas por la suma de varias ecuaciones en términos de una misma variable [42].

En estos modelos se describen la dependencia en longitud de onda de la irradiancia espectral que se ven afectados por los componentes atmosféricos al llegar a nivel superficial, siendo estos componentes: vapor de agua, ozono, anhídridos carbónicos, oxígeno y aerosoles que son las partículas micrométricas en suspensión [42].

El modelo matemático se lo realizó en Matlab para el día 15 de mayo, se tomó este día por ser un día nublado, para lo que se necesitó algunos datos que se tomaron en cuenta



para el modelado anterior, como lo es la constante solar ( $G_{sc}$ ), la declinación ( $\delta$ ), la latitud ( $\phi$ ) y longitud (Ll). Para el modelo matemático se necesita el cálculo del tiempo solar verdadero (TVS), el cual se lo calculó con la ecuación (3.9), en base a las ecuaciones (3.10) y (3.11). Con el tiempo solar verdadero se calcula el ángulo horario ( $w$ ), con la ecuación (3.12).

El ángulo cenital se lo calculó con la ecuación (3.13), en base a los datos conocidos y el ángulo horario. Otro valor necesario es el ángulo horario al ocaso que se lo calculó con la ecuación (3.1).

La masa óptica del aire relativo ( $mr$ ) se lo calcula en base al ángulo cenital con la ecuación (3.21) [42].

$$mr = \frac{1}{\cos(\theta_z) + 0,50572 * 96,07995 - (\theta_z)^{-1,6364}} \quad (3.21)$$

La masa de aire a la presión actual ( $ma$ ) se lo calcula con la ecuación (3.22) [42].

$$ma = \frac{mr * p}{1013,25} \quad (3.22)$$

Dónde:

$mr$ : La masa óptica del aire relativo.

$p$ : La presión atmosférica en mbar, para nuestro caso la presión ( $p$ ) = 717,7 mbar.

También se necesita el producto espesor por masa óptica relativa ( $U3$ ) como se observa en la ecuación (3.23) y el producto de contenido de agua precipitante por masa óptica relativa ( $U1$ ) que se lo calcula con la ecuación (3.24), [42].

$$U3 = 1 * mr \quad (3.23)$$

$$U1 = ws * mr \quad (3.24)$$

Dónde:

$ws$ : Cantidad de agua precipitada, valor típico 2cm.

$mr$ : La masa óptica del aire relativo.

Con las formulas calculadas anteriormente se puede calcular la transmitancia por dispersión Rayleigh (Tr) con la ecuación (3.25) [43].

$$Tr = e^{-0,0903*(ma^{0,84})*(1+ma^{1,01})} \quad (3.25)$$

La transmitancia de la radiación debido a la absorción por el ozono (To) se calcula con la ecuación (3.26) [43].

$$To = 1 - (0,1611 * U3 * (1 + 139,48 * U3)^{-0,3035} - 0,002715 * U3 * (1 + 0,044 * U3 + 0,0003 * U3^2)^{-1}) \quad (3.26)$$

La transmitancia debido a la absorción por gases uniformemente mezclados se calcula con la ecuación (3.27) [42].

$$Tg = e^{-0,0127*ma^{0,26}} \quad (3.27)$$

La transmitancia debido a la absorción por vapor de agua (Tw) se calcula con la ecuación (3.28) [42].

$$Tw = 1 - 2,4959((1 + 79,034 * U1)^{0,6828} + 6,385 * U1)^{-1} \quad (3.28)$$

La transmitancia de radiación debida a la atenuación por los aerosoles (Ta) se calcula con la ecuación (3.29) [42].

$$Ta = ((0,97 - 1,265 * Vis)^{-0,66})ma^{0,9} \quad (3.29)$$

Donde (Vis) es el factor de visibilidad que depende de las condiciones atmosféricas, sus valor se los observar en la tabla 3.2 [42].

**Tabla 3.2** Valores de visibilidad para distintas condiciones atmosféricas [44]

Atmósfera	$\beta$	$\alpha$	Visibilidad (Km)
Limpia	0	1,3	340
Clara	0,1	1,3	28
Turbia	0,2	1,3	11
Muy Turbia	0,4	1,3	<5

En nuestro día el valor de (Vis), será cambiante por motivo lógico ya que en un día este valor depende de sus condiciones atmosféricas. La transmitancia de la radiación debida a la absorbancia del aerosol (Taa) se calcula con la ecuación (3.30) [43].

$$Taa = 1 - (1 - wo) * (1 - ma + ma^{1,06}) * (1 - Ta) \quad (3.30)$$

Donde wo es el valor del albedo de dispersión simple y su valor es 0,9 [36]. Para poder encontrar la irradiancia solar directa se calcula el factor de corrección por excentricidad (Eo), el cual se lo calcula con la ecuación (3.31) [43].

$$Eo = 1,00011 + 0,034221 * \cos(\gamma) + 0,00128 * \sin(\gamma) + 0,000719 * \cos(2\gamma) + 0,000077 * \sin(2\gamma) \quad (3.31)$$

Donde ( $\gamma$ ) se calcula con la ecuación (3.32):

$$\gamma = 2\pi * \frac{z-1}{365} \quad (3.32)$$

La irradiancia solar directa horaria (In) una vez calculado todas las transmitancias, In se calcula con la ecuación (3.33) [43]

$$In = 0,9751 * Eo * Gsc * Tr * To * Tg * Tw * Ta \quad (3.33)$$

Para la modelación de la irradiancia difusa, se calculó la irradiancia difusa por dispersión de Rayleigh (Idr) en base a la ecuación (3.34) [43].

$$Idr = 0,79 * Gsc * \cos(\theta z) * To * Tg * Tw * Taa * \frac{0,51(1-Tr)}{1-ma+ma^{1,02}} \quad (3.34)$$

Donde la transmitancia debido a la dispersión de aerosoles (Tas), se calcula con la ecuación (3.35) [43].

$$Tas = \frac{Ta}{Taa} \quad (3.35)$$

Otro factor que se necesita para la radiación difusa es la irradiancia difusa por dispersión de aerosoles ( $I_{da}$ ), para lo cual se calcula con la ecuación (3.36) [43].

$$I_{da} = 0,79 * G_{sc} * \cos(\theta_z) * T_o * T_g * T_w * T_{aa} * \frac{F_c(1-T_{as})}{1-ma+ma^{1,02}} \quad (3.36)$$

Donde  $F_c$  es la relación entre la energía hacia adelante y la energía total dispersada, su valor es 0,84. El siguiente factor para calcular la irradiancia difusa es la irradiancia difusa luego de las múltiples reflexiones entre la tierra y su atmósfera, se la calcula en base a la ecuación (3.37) [42].

$$I_{dm} = (I_n * \cos(\theta_z) + I_{dr} + I_{da}) * A_a * \frac{A_g}{1-A_a * A_g} \quad (3.37)$$

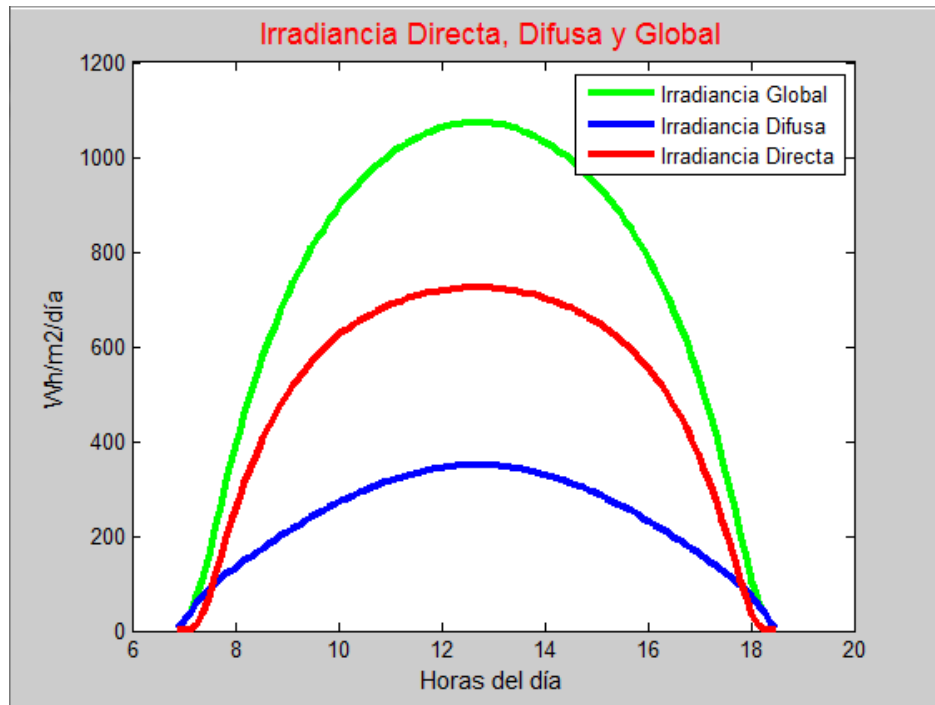
Donde se necesita el albedo de la tierra ( $A_g$ ) y su valor es 0,37 y el albedo atmosférico se calculó con la ecuación (3.38) [42].

$$A_a = 0,0685 + (1 - F_c) * (1 - T_{as}) \quad (3.38)$$

Finalmente la irradiancia difusa horaria es la suma de las tres irradiancias calculadas anteriormente como muestra en la ecuación (3.39) [42].

$$I_d = I_{dr} + I_{da} + I_{dm} \quad (3.39)$$

Del modelo matemático se obtiene la Figura 3.14, como prueba se colocará un valor de visibilidad de 10 Km constante, sabiendo que este valor depende de las condiciones atmosféricas, en la comprobación este valor se lo variará, dependiendo de las condiciones atmosféricas del día escogido, en la curva se observa la irradiancia solar directa, difusa y global horaria para el día descrito, el modelo en Matlab se observa en el Anexo 7.



**Figura 3.14** Curva de la irradiancia directa, difusa y global horaria para las horas del día para el modelo matemático

**Fuente:** *[Propio del autor]*

## CAPÍTULO IV

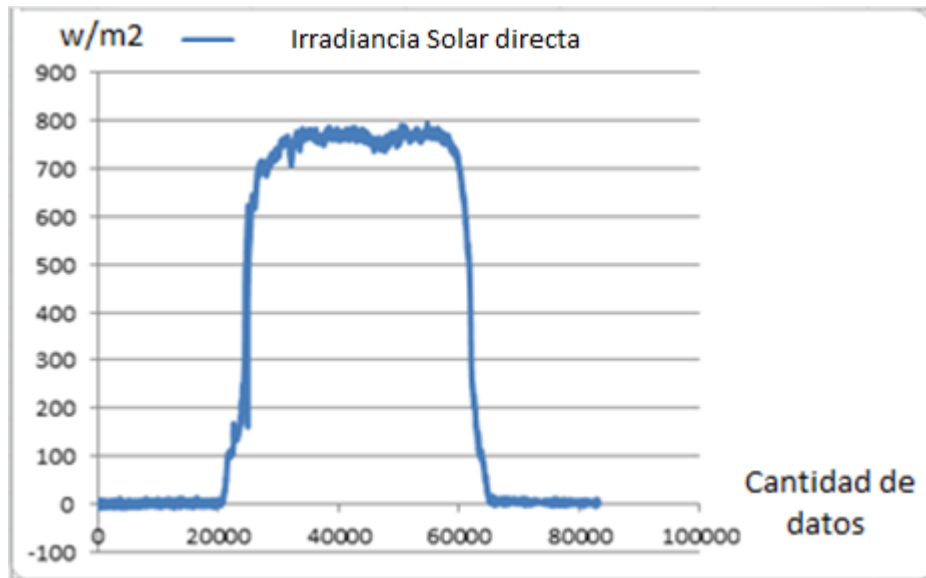
### ANÁLISIS DEL MODELO MATEMÁTICO

En el presente capítulo se analizó el modelo matemático, para lo cual se necesitó verificar el recurso solar que se tomó para la comparación del modelo matemático, se comparó, con datos de la radiación difusa medidos, para la comprobación del modelo matemático para los promedios mensuales, esto datos se tomó de la página de la NASA, la cual recopila los datos mediante satélite, estos datos incluyen estimaciones a largos plazos. Para la comparación del modelo matemático de la radiación difusa horaria, se tomó los datos proporcionados por el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER), en base a estas comparaciones se analizó la eficiencia de los modelos matemáticos, tanto para los promedios mensuales como para los promedios horarios.

#### 4.1 Verificación del Recurso Solar

Con la medición del recurso solar se obtuvo la radiación solar directa, siendo la que llega a una superficie sin haber tenido dispersión en la atmósfera, la medición se la realizó mediante una plataforma informática la cual recopiló datos de voltaje y permitió en base a una relación entre los datos de placa y la recopilación de datos de voltaje, encontrar la medida de irradiancia en ( $\text{w/m}^2$ ), explicado en el capítulo 3, en la Figura 4.1 se observa la curva de irradiancia, medidos el día 12 de marzo del 2014, para su obtención se midieron más de 80.000 valores, esto porque que se tomaron datos cada segundo, en el Anexo 1 se puede observar los valores promedios para la obtención de la curva.

La medición permitió analizar el comportamiento del recurso solar, pero no se lo puede utilizar en la comparación del modelo matemático de la irradiancia difusa para promedios horarios, porque la medición se la realizó para la irradiancia solar directa.



**Figura 4.1** Curva de la irradiancia medido el 12 de marzo del 2014

**Fuente:** [Propio del autor]

#### **4.1.1 Datos de la NASA para la radiación difusa en promedios mensuales en un plano horizontal.**

Para el presente estudio es necesaria la radiación difusa en promedios diarios mensuales en un plano horizontal, es por tal razón que se tomaron datos de la página de la NASA para la comprobación del modelo matemático para los promedios diarios mensuales. Los datos que me entrega la página de la NASA son valores promedios diarios mensuales, con los cuales se comprobó que los valores obtenidos en el modelo matemático.

La NASA, mediante su programa de investigación en ciencias de la Tierra apoya a los estudios realizados mediante satélite que proporcionan datos para el estudio de procesos climáticos. Estos datos incluyen las estimaciones a largo plazo de cantidades meteorológicas y flujos superficiales de energía solar [38].

Los datos obtenidos de satélite y basados en modelos también se han demostrado ser lo suficientemente preciso para proporcionar datos de recursos solares fiables sobre las regiones donde las mediciones de superficie son escasas o inexistentes. Por tal motivo, el programa de ciencias aplicadas de la división de ciencias de la Tierra de la NASA ha

proporcionado los medios necesarios para hacer que esta información esté disponible para el uso del sector público. Para fomentar el uso de los datos de energía solar, la NASA apoyó y sigue apoyando, el desarrollo de la meteorología de superficie y de energía solar [45]. La página de la NASA de la cual se pueden obtener los valores expuestos para la comparación es:

<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov> [38].

Para obtener los valores de la página de la NASA, los datos de entrada necesarios son la latitud y la longitud, esta página es muy útil para estudios relacionados con energías renovables, ya que en esta página se pueden ver datos de radiación solar directa, de la radiación solar difusa, de la velocidad del viento, dirección del viento, temperatura entre otras, en la Figura 4.3 se puede observar la página de la NASA.

**Figura 4.2** Página de la NASA

**Fuente:** NASA, «Atmospheric Science Data Center,» [En línea]. Available: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov>. [Último acceso: 12 10 2014].



#### **4.1.2 Datos del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables en promedios horarios para la radiación difusa en un plano horizontal**

Para la comprobación del modelamiento de la radiación difusa para valores horarios medios mensuales, se utilizaron datos obtenidos del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) que es una institución de investigación pública que genera aportes al conocimiento mediante estudios de eficiencia energética y energías renovables, fue creado por el Decreto Ejecutivo No. 1048 el 28 de febrero del 2012 [46].

Los datos que fueron proporcionados por el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER), fue del proyecto: Métodos para el Control de Calidad y Complementación de Datos Faltantes en Parámetros Meteorológicos Relacionados con la Utilización de Energías Renovables.

El piranómetro utilizado en el proyecto para la medición de la radiación global es la CMP 6 piranómetro, está destinada a la medición sobre una superficie plana, cuenta con 64 uniones de termopar conectados en series. El sensor tiene un recubrimiento de carbono altamente estable, que ofrece una excelente absorción espectral y características de estabilidad a largo plazo [47].

Para la medición de la radiación solar difusa se utilizó el anillo sombra C CM 121B, la combinación del piranómetro con el anillo de sombra ofrece la solución para la medición de la radiación difusa, la sombra del anillo cubre la cúpula del piranómetro completamente, en la Figura 4.3 se observa el piranómetro con el anillo de sombra [47].



**Figura 4.3** *CM 12B/C Shadow Ring*

**Fuente:** «Kipp y Zonen,» [En línea]. Available: <http://www.kippzonen.es/Product/42/CM-121B-C-Shadow-Ring#.VGF7VfnF-rA> .[Último acceso: 10 11 2014].

## **4.2 Comprobación del Modelo Matemático**

### **4.2.1 Comprobación para el modelo promedio diario mensual de la radiación difusa en un plano horizontal**

Para la comprobación del modelo matemático expuesto en el capítulo 3.4, se tomaron datos de la NASA, para la comprobación de los promedios diarios mensuales, los datos de entrada necesarios para el modelo matemático, al igual que para la página de la NASA son: Latitud:  $0^{\circ} 11' 08.17''$ , Longitud:  $78^{\circ} 29' 48.04''$ , Altura: 2835, estos valores fueron tomados del colegio San Gabriel, con ayuda de un GPS.

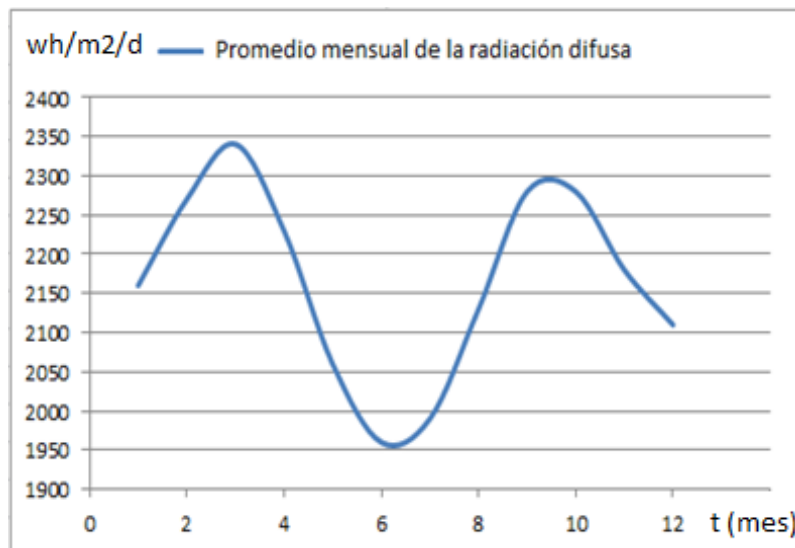
Una vez ingresado los datos de latitud y longitud en la página de la NASA, se obtuvieron valores con promedios mensual de la radiación solar directa y de la radiación solar difusa como se observa en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Promedios mensuales de la radiación directa y difusa según la página de la NASA

**Fuente:** [NASA]

Meses	Radiación Directa NASA (kWh/m <sup>2</sup> /día)	Radiación Difusa NASA (kWh/m <sup>2</sup> /día)
Enero	2,98	2,16
Febrero	3,00	2,27
Marzo	3,11	2,35
Abril	3,01	2,23
Mayo	3,07	2,06
Junio	3,16	1,96
Julio	3,46	1,99
Agosto	3,38	2,13
Septiembre	2,8	2,28
Octubre	2,8	2,28
Noviembre	3,15	2,18
Diciembre	2,85	2,11
Promedio Anual	3,06	2,17

Los datos que se obtuvieron de la página de la NASA son de un promedio de 22 años lo que lo hace confiable por la cantidad de muestras que se obtuvieron para realizar los promedios mensuales. En la Figura 4.4 se observa la curva obtenida de los promedios mensuales de la radiación solar difusa, para los doce meses del año, según la NASA.



**Figura 4.4** Curva de la radiación solar difusa de valores promedio mensual.

**Fuente:** [Propio del autor]

La comparación se la realizó con los datos obtenidos de la NASA para poder apreciar si el modelo matemático realizado en Matlab es confiable. Para el modelo matemático calculado mediante el índice de claridad ( $K_t$ ) expuesto en el capítulo 3, los datos a ingresar en el modelo matemático son los de latitud, longitud y altura, el modelo está evaluado para todo el año.

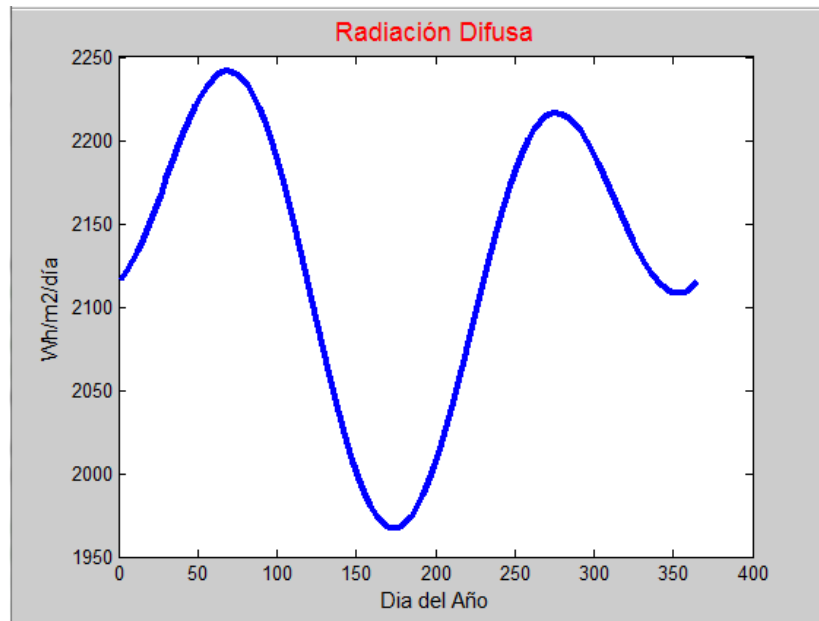
En la Tabla 4.2 se puede apreciar los valores calculados mediante el modelo matemático, para los promedios mensuales del modelo matemático, se los obtuvo mediante el día tipo visto en la Tabla 1.1 para los doce meses del año, en la tabla también se observa el error relativo generado al compararlo con los datos obtenidos de la página de la NASA, para los promedios mensuales.

**Tabla 4.2** Promedios mensuales de la radiación difusa según el modelo matemático y el error absoluto comparado con los promedios mensuales de la NASA

**Fuente:** [Propia del Autor]

Meses	Radiación Difusa modelado ( $\text{Wh/m}^2/\text{día}$ )	Error relativo comparado con los valores de la NASA
Enero	2144,6	0,717
Febrero	2216,6	2,356
Marzo	2240	4,705
Abril	2172,6	2,578
Mayo	2051,9	0,398
Junio	1975,9	0,806
Julio	2001,3	0,563
Agosto	2107,3	1,07
Septiembre	2199,6	3,53
Octubre	2209,6	3,092
Noviembre	2153	1,243
Diciembre	2111,6	0,071

En la Figura 4.5 se observa la curva obtenida por el modelo matemático para los promedios mensuales de la radiación difusa, que en comparación con la curva que se obtuvo de la página de la NASA es muy similar.



**Figura 4.5** Curva de la radiación difusa diaria mensual para los días del año

**Fuente:** [Propio del autor]

#### 4.2.2 Comprobación para el modelo horario de la radiación difusa

La comprobación del modelo matemático para los promedios horarios de la irradiancia difusa realizado en Matlab, se utilizó los datos tomados del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER), de estudios que los están realizando en Riobamba en algunas localidades que son: Cumanda, Multitud, Quimiag, Tixan, San Juan, Atillo, Tunshi, Espoch, Urbina, Unach, Jubal y Achupallas.

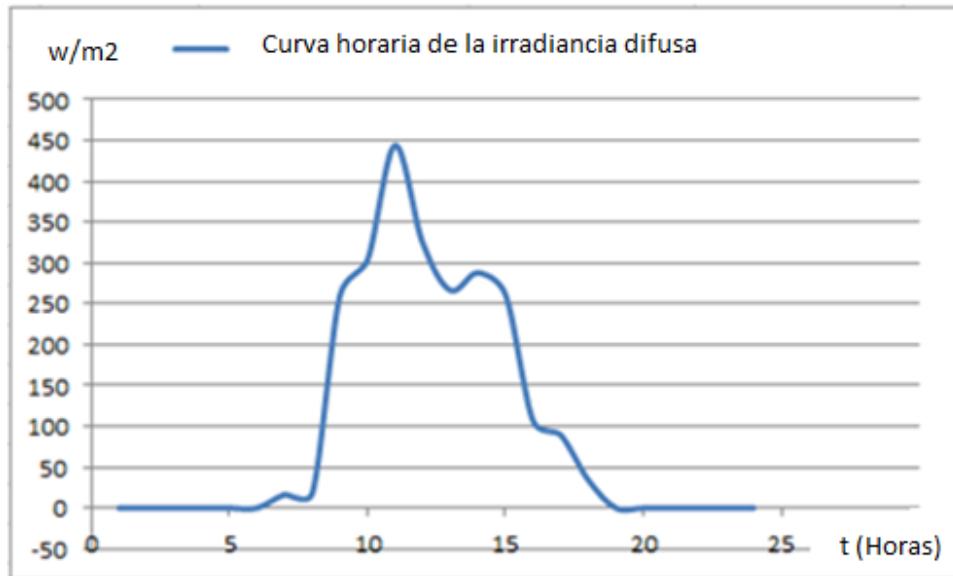
Los datos obtenidos son valores horarios, que fueron tomados de diciembre del año pasado a junio de presente año, la localidad que se tomó para la comparación de los datos proporcionados por el INER con las del modelo matemático fue la de la ESPOCH. Se tomaron los valores del 15 de Mayo del 2014, en la Tabla 4.3, se observan los promedios horarios de la irradiancia solar difusa y los promedios horarios de la radiación solar global.

**Tabla 4.3** Promedios horarios de la radiación difusa y global del INER

**Fuente:** [Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables]

MES	HORA	Fecha	Rad_Dif_Pro	Rad_Glo_Pro
5	0	15/05/2014 0:00	0	0
5	1	15/05/2014 1:00	0	0
5	2	15/05/2014 2:00	0	0
5	3	15/05/2014 3:00	0	0
5	4	15/05/2014 4:00	0	0
5	5	15/05/2014 5:00	0	0
5	6	15/05/2014 6:00	16,5	18,5
5	7	15/05/2014 7:00	18	20
5	8	15/05/2014 8:00	259,6666667	373,1666667
5	9	15/05/2014 9:00	303,6666667	346,5
5	10	15/05/2014 10:00	444	612
5	11	15/05/2014 11:00	324,6666667	975,1666667
5	12	15/05/2014 12:00	266,6666667	947,5
5	13	15/05/2014 13:00	288,1666667	1060
5	14	15/05/2014 14:00	261,1666667	842,6666667
5	15	15/05/2014 15:00	107	600,8333333
5	16	15/05/2014 16:00	89,5	294,6666667
5	17	15/05/2014 17:00	34,5	70,16666667
5	18	15/05/2014 18:00	0	0
5	19	15/05/2014 19:00	0	0
5	20	15/05/2014 20:00	0	0
5	21	15/05/2014 21:00	0	0
5	22	15/05/2014 22:00	0	0
5	23	15/05/2014 23:00	0	0

De la Tabla 4.3 expuesta, se puede graficar la curva del promedio horario de la radiación difusa, en la que se observa un día nublado por los valores de la irradiancia difusa obtenidos, en la Figura 4.6 se observa la curva horaria de la irradiancia difusa.



**Figura 4.6** Curva horaria de la irradiancia difusa tomada para el 15 de mayo del INER.

**Fuente:** [Propio del autor]

Para el modelo matemático, el día analizado es el 15 de Mayo, por lo que el número del año (z) será 135, las magnitudes de longitud y latitud de la localidad escogida la ESPOCH es: Longitud:  $78^{\circ} 40' 51.99''$  O y de Latitud:  $1^{\circ} 39' 19.66''$  S, estos valores se obtuvieron de Google Eart, en la Figura 4.7, se puede observar la localidad y los valores de latitud y longitud, necesarias para el modelo matemático.



**Figura 4.7** Mapa de la ESPOCH

**Fuente:** [Google Eart ]

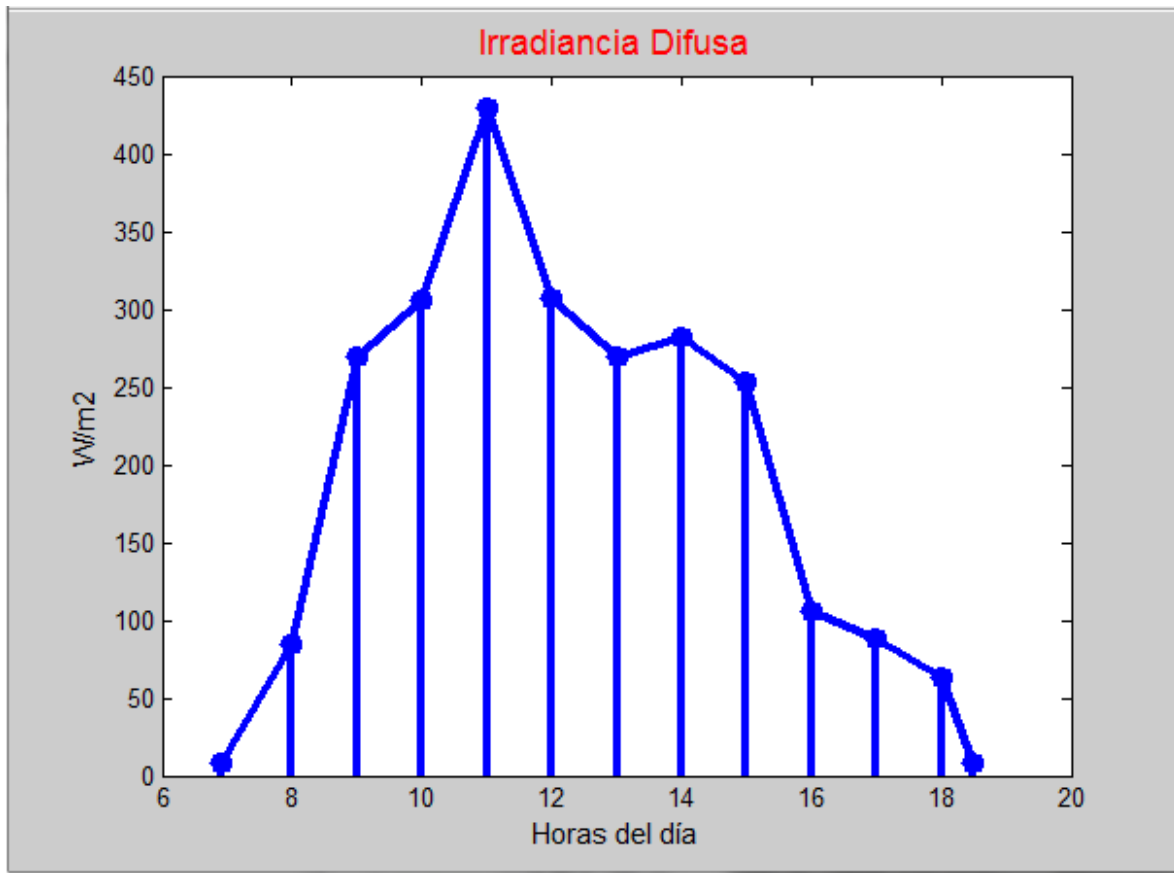
Otros valor a tomar en cuenta para el modelado es la declinación, este valor se lo puede observar en la Tabla 1.1, en el cual se indica el día tipo y el valor de la declinación promedio por meses o a su vez mediante la ecuación (1.6), que calcula este valor mediante (z) que es el día del año, que para nuestro caso es el 135.

Para el cálculo del tiempo solar verdadero, calculado con las ecuaciones: (3.9), se necesita el ingreso de la hora local o el tiempo oficial, al igual que el adelanto respecto de la hora civil (e), para verano es 2h y en invierno es (1). Para el cálculo del tiempo solar verdadero (TVS), es necesario conocer la longitud del meridiano medio del huso horario adoptado, para nuestro caso es (Ls):-75°.

Otro valor a ingresar es la presión en mbar, para nuestro caso es 717 mbar, este valor para el cálculo de la masa de aire a la presión actual. El valor del albedo de la tierra ( $A_g$ ) también es un valor a ingresar y es de 0,37, para el cálculo de la irradiancia difusa luego de múltiples reflexiones entre la tierra y su atmosfera. El albedo de dispersión simple ( $w_o$ ), toma un valor de 0,9 [42]. En la cantidad de agua precipitada, se ingresó 2cm que es el valor típico.

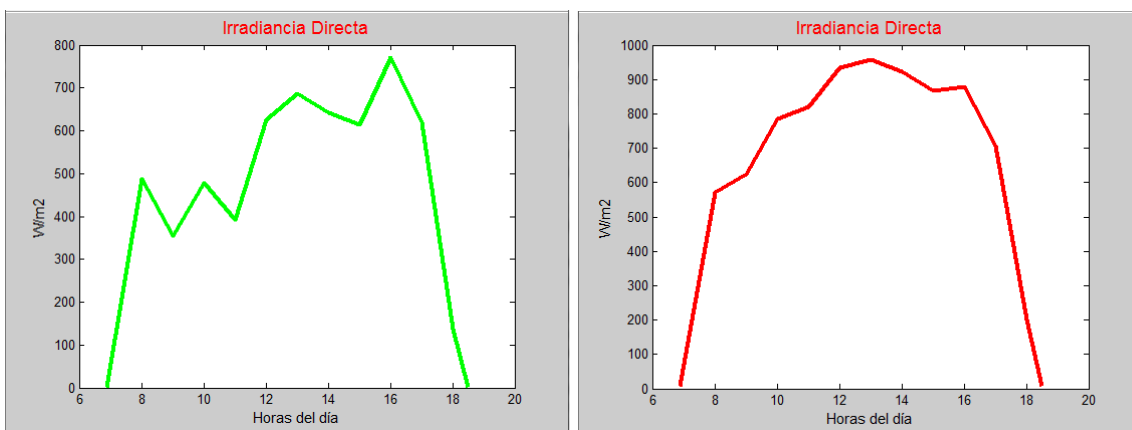
Para el modelo matemático en Matlab un factor muy importante es el valor de la visibilidad que viene dado en Km, y dependen de las condiciones atmosféricas del día, del análisis realizado del día 15 de mayo se puede decir que fue un día nublado, por motivo que los valores medidos fueron proporcionados por el (INER), los valores de visibilidad se los adoptó, según los registros de la Tabla 4.4. En la Figura 4.8 se observa la gráfica obtenida en Matlab de la irradiancia solar difusa, en base a los datos ingresados, explicados anteriormente. En la Figura 4.9 se obtiene la irradiancia solar directa, al igual que la irradiancia solar global del modelo matemático.





**Figura 4.8** Irradiancia solar difusa horaria para el 15 de Mayo

**Fuente:** [Propias del Autor]



**Figura 4.9** Irradiancia solar global y directa horaria para el 15 de Mayo

**Fuente:** [Propias del Autor]

La comprobación se lo realizó a ciertas horas específicas del día, desde las 8:00 hasta las 14:00 cada hora, para poder realizar la comparación, se tomaron datos del (INER), que se expuso en la Tabla 4.3, y se visualiza en la figura 4.6. En la Tabla 4.4 se observa los valores resultantes de la radiación difusa del modelo matemático, al igual que los valores de radiación difusa proporcionados por el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER).

**Tabla 4.4** Valores de la radiación solar difusa calculados vs medidos

**Fuente:** [Propias del Autor]

Fecha	Rad_Dif_Pro	Rad_Dif (Modelo Matemático)	Visibilidad
15/05/2014 8:00	259,6666667	269,6529	5
15/05/2014 9:00	303,6666667	305,5292	5
15/05/2014 10:00	444	428,8986	3
15/05/2014 11:00	324,6666667	307,4414	6
15/05/2014 12:00	266,6666667	269,3750	8
15/05/2014 13:00	288,1666667	281,3374	7
15/05/2014 14:00	261,1666667	253,2086	8

En las Tabla 4.4 se puede apreciar que los valores calculados son similares a los medidos que fueron proporcionados por el INER, los valores de visibilidad expuestos en la tabla se los ingreso tomando en cuenta la Tabla 3.2, en la que se tiene los valores de visibilidad para las distintas condiciones atmosféricas, en los valores se observa que fue un día turbio y muy turbio en la mañana y parte de la tarde. Para nuestra comparación del día se tomó los valores de visibilidad de la una página web del tiempo meteorológico la cual es:

<http://www.accuweather.com/es/ec/riobamba/122060/overnightweatherforecast/122060?day=1> [48].

En la página web se dan los valores de visibilidad de la madrugada, mañana, tarde y noche, para nuestro día el 15 de mayo del 2014, en la localidad de Riobamba, los valores de visibilidad son: en la mañana fue de 5Km, a las 10:00 fue 3Km, al medio días fue 7Km y en la tarde fue de 8Km, como se observan en la tabla 4.4.

### **4.3 Análisis de Eficiencia**

#### **4.3.1 Análisis de eficiencia para el modelo matemático para los promedios mensuales de la radiación difusa**

El análisis de eficiencia se lo realizó en base al cálculo del error relativo porcentual en el cual se aprecia la precisión del modelo matemático en base a las medidas de la página de la NASA, poniéndolo como valor exacto, al igual que en la Figura 4.4 y la Figura 4.5, en las que se pueden observar que las curvas tienen la misma tendencia.

El modelo matemático realizado para los promedios mensuales, resultó ser confiables, por el bajo porcentaje de error, encontrado en la comparación, expuesta en la Tabla 4.2, el porcentaje de error no excede 5%, razón por la cual se puede decir que el modelo matemático puede ser aplicable, para la comparación se tomaron diferentes localidades dando como resultado porcentajes de error que no pasaron del 6%, similares porcentajes obtenidos en la tabla 4.2.

#### **4.3.2 Análisis de eficiencia para el modelo matemático horario de la radiación difusa**

Para estimar el promedio horario de la radiación solar difusa se tomó el modelo matemático que se lo realizó en base a estudios realizados por Wolf Zissis, este modelo matemático se basa en varias expresiones, ecuaciones que describen la transferencia radiactiva de las componentes de la radiación solar directa y difusa, al igual de ecuaciones que da la posición angular (cenital) del sol en el cielo y las ecuaciones para encontrar el tiempo solar verdadero.

El modelo matemático tiene un dato de ingreso el cual será cambiante y que dependerá de las condiciones atmosféricas que es el factor de visibilidad, estos valores fueron tomados de la página web del tiempo meteorológico anteriormente mencionado, razón por lo que se ingresaron los valores de visibilidad expuestos en la Tabla 4.4.

La eficiencia del modelo matemático depende del error relativo encontrado entre los valores calculados con el modelo matemático y los valores medidos, proporcionadas por el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, el resultado se lo observa en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5** Error relativo de los valores calculados en base a los medidos.

**Fuente:** [Propia del Autor]

Fecha	Rad_Dif_Pro Medido (w/m <sup>2</sup> )	Rad_Dif Calculado (w/m <sup>2</sup> )	Error absoluto	Error relativo (%)
15/05/2014 8:00	259,6666667	269,6529	-9,9862	-3,85
15/05/2014 9:00	303,6666667	292,1105	-1,8625	-0,61
15/05/2014 10:00	444	428,8986	15,1014	3,40
15/05/2014 11:00	324,6666667	307,4414	17,2253	5,31
15/05/2014 12:00	266,6666667	269,3750	-2,7083	-1,02
15/05/2014 13:00	288,1666667	281,3374	6,8293	2,37
15/05/2014 14:00	261,1666667	253,2086	7,9581	3,05

De la Tabla 4.5, se observan los valores del error absoluto que nos indica el grado de aproximación que nos da una idea de la calidad del cálculo y el error relativo porcentual en el cual se aprecia la precisión del modelo matemático. Se puede concluir que los valores calculados con el modelo matemático nos dan un error relativo bajo, en base a los valores de visibilidad ingresados. En la Tabla 4.5 se puede observar valores negativos en el error absoluto y relativo, en el error relativo esto se da por que el error puede ser por exceso o por defecto, no tiene unidades.

#### **4.4 Interpretación de Resultados**

El modelo matemático realizado para los promedios mensuales por lo demostrado en el punto anterior es muy confiable por el porcentaje bajo del error, comparado con los datos de la página de la NASA.

En conclusión los valores calculados con el modelo matemático para los promedios horarios es muy viable pero depende de vario valores de ingresos, horas del día, la latitud, longitud, cantidad de agua precipitada, presión, el valor del albedo de la tierra, el albedo de dispersión simple, el adelanto respecto de la hora civil y la principal que es la visibilidad, este es el factor que para nuestro modelo matemático se lo vario ya que depende de las condiciones atmosféricas.

El resultado fue el esperado dando un error relativo porcentual bajo, un indicador que los valores calculados con el modelo matemático y comparado con los datos proporcionados por el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables son viables para futuros estudios.

## CONCLUSIONES

La generación de energía eléctrica mediante paneles solar fotovoltaica es influenciada por las condiciones atmosféricas, esto partiendo del hecho que en un día nublado la radiación es prácticamente dispersada en su totalidad, mientras que en un día con clima seco, los paneles solares captan mayor radiación incidente esto al no sufrir cambios en su dirección.

Con el estudio realizado se estimó la radiación solar difusa para promedios mensuales, el modelo matemático utilizado se basa en el índice de claridad ( $K_t$ ) de la ecuación (3.6), de un estudio realizado para el Distrito Metropolitano de Quito, este estudio se basó en registros históricos de estaciones de la secretaría del ambiente y de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento, y con comparaciones con el atlas solar del CONELEC, se llega a la conclusión que dicha ecuación es el más óptimo. Con el índice de claridad se calcula la radiación global ( $H$ ), en base a la ecuación (3.5), y la radiación solar difusa para promedios mensuales se lo calculo con la ecuación (3.7).

La medición del recurso solar incidente en un plano horizontal se lo realizó en base al método voltímetro - amperímetro, para esto se deberá tener en cuenta los datos de placa del panel fotovoltaico, ya que el este método consiste en tomar los valores de voltaje que genera el panel solar a lo largo del día, y mediante una regla de tres relacionar el voltaje pico y la irradiancia de placa, con los valores de voltaje medidos, así se podrá encontrar la irradiancia al nivel de voltaje que genera el panel fotovoltaico.

Para realizar la estimación de la radiación solar difusa horaria son necesarios varios datos de ingreso los cuales son: la longitud, latitud, la hora del día, el día del año en la que se va a realizar la estimación horaria, la presión en mbar, el valor del albedo de la tierra, el albedo de dispersión simple, la cantidad de agua precipitada y la visibilidad del día, la confiabilidad del modelo matemático depende de los datos de ingreso.

El modelo matemático para la estimación de la radiación solar difusa horaria, describen la dependencia en longitud de onda de la irradiancia espectral, esta se ve afectada por los

componentes atmosféricos al llegar a nivel superficial, siendo estos componentes: vapor de agua, ozono, anhídridos carbónicos, oxígeno y aerosoles que son las partículas micrométricas en suspensión, es por tal razón que el modelo matemático es viable.

La estimación horaria de la radiación difusa se basa en el factor de visibilidad, ya que es el factor el que determina la mejor aproximación, este valor se lo obtuvo de la página web del tiempo meteorológico en el cual nos da el valor de visibilidad en Km, al hacer la comparación con los valores medidos por el INER (Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energía Renovables), se observó el comportamiento del modelo frente a la medición, resultando ser el modelo matemático confiable.

En conclusión con el cálculo del error del modelo matemático para la estimación de la radiación solar difusa horaria con respecto a las medidas proporcionadas por el INER (Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energía Renovables), nos permite verificar que el modelo matemático es muy viable, al encontrar que el error es muy bajo a lo largo del día.

## RECOMENDACIONES

Para realizar la estimación de la radiación solar difusa horaria se recomienda verificar los valores ingresados para obtener una mayor confiabilidad del modelo matemático, ya que el modelo matemático necesita de varios datos de ingreso y los cuales son: la longitud, latitud, la hora del día, el día del año en el que se va a realizar la estimación horaria, la presión en mbar, el valor del albedo de la tierra, el albedo de dispersión simple, la cantidad de agua precipitada y la visibilidad del día.

Es recomendable para análisis de la radiación solar, el tomar datos con un margen de tiempo muy corto entre una medida y otra, lo que nos permite tener un mejor panorama para tener un mejor análisis, es por tal razón que la medición del recurso solar incidente en un plano horizontal realizada mediante el método voltímetro – amperímetro, se la realizó cada segundo dando un margen de error muy bajo.

Se sugiere que para la aplicación del modelo matemático de la estimación de la radiación solar difusa horaria, se tenga una medición confiable del recurso solar, como el proporcionado para la comparación del modelo matemático por el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energía Renovables (INER), medidas realizadas para el proyecto : Método para el Control de Calidad y Complementación de Datos Faltantes en Parámetros Meteorológicos Relacionados con la Utilización de Energías Renovables. Tal medición fue realizada con el piranómetro CMP 6 y con un anillo de sombra, la cual cubre la cúpula del piranómetro completamente, está destinada a la medición sobre una superficie plana.



## REFERENCIAS

- [1] L. Jutglar, Energía Solar, Ediciones Ceac ed., vol. 1, Barcelona : Aleph, 2004, p. 265.
- [2] Z. y. M. Viejo, Energías Eléctricas y Renovables, 4 ed., Mexico: LIMUSA, 2010, p. 312.
- [3] J. M. M. y. R. C. G. Bureau Veritas Business, Energía Solar Termica, Tercera ed., Madrid: Fundación Confemetal, 2010, p. 522.
- [4] M. A. Sanchez, Energía Solar Fotovoltaica, G. Noriega, Ed., Mexico D.F.: LIMUSA, 2011, p. 313.
- [5] J. C. Y. y. J. M. Lopez, «T E S I S - Instituto Politécnico Nacional,» 2009. [En línea] .Available:[http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/5641/1/ESTUDI OELECTRIFICAC.pdf](http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/5641/1/ESTUDI%20OELECTRIFICAC.pdf). [Último acceso: 01 04 2013]. [6] M. P. Jara and J. Rosel, Análisis de series temporales Un ejemplo de aplicación en ámbitos psicológicos. p. 127.
- [6] Y. Jiang, «Daily Diffuse Solar Radiation at Beijing,» Beijing, 2009.
- [7] G. E. Harper, El ABC de las instalaciones eléctricas en sistemas eólicos y fotovoltaicos, G. Noriega, Ed., Mexico D.F.: LIMUSA, 2012, p. 365.
- [8] J. M. Poblet, Energía Solar Fotovoltaica, 1 ed., Mexico: Boixarev, 1983, pp. 69,70.
- [9] «SENSOVANT,» [En línea]. Available: <http://sensovant.com/productos/meteorologia/radiacion-solar/articulo/piranometro-portatil-precio-venta-economico-LP02.html>. [Último acceso: 26 11 2014].
- [10] «Paloma,» [En línea]. Available: <http://palomi28.blogspot.com/2010/10/elpirheliometro.html>.. [Último acceso: 11 08 2013].
- [11] «Guías Prácticas.com,» [En línea]. Available: <http://www.guiaspracticas.com/estaciones-meteorologicas/heliografo>. [Último acceso: 26 11 2014].
- [12] E. Sierra, «Documento pdf,» 01 11 2010. [En línea]. Available: [http://www.fing.edu.uy/if/solar/proyectos/SOLARIMETRIA\\_E.Sierra\\_.pdf](http://www.fing.edu.uy/if/solar/proyectos/SOLARIMETRIA_E.Sierra_.pdf). [Último acceso: 31 10 2013].
- [13] J. A. y. W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, Segunda ed., J. Wiley, Ed., Madison. Wisconsin: JOHN WILEY & SONS, INC, 1980, p. 928.

- [14] M. A. S. Maza, *Energía Solar Termica*, Mexico: LIMUSA, 2008, p. 345.
- [15] S. S. «Centrales Solares,» 11 2009. [En línea]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/277/A6.pdf?sequence=6>. [Último acceso: 05 11 2013].
- [16] C. S. López, *Energía Solar Fotovoltaica*, vol. Tomo 7, Boixareu, Ed., Barcelona: Marcombo, 1983, p. 269.
- [17] V. A. Madrid, «Energía Solar Fotovoltaica,» de *Cursos de Energía Solar( Foltovoltaico )*, 1 ed., AMV, Ed., Madrid, Mundi-Prensa, 2009, pp. 59,60,61.
- [18] R. G. y. E. D. R. Luciano Cervantes, «BAA JAWA: UN SISTEMA PILOTO DE DESTILACIÓN DE AGUA SALOBRE CON ENERGÍA SOLAR,» CRIDA, Obregón, 2004.
- [19] «Cocina Solar,» Artesanal, [En línea]. Available: <http://www.cocinasolar.org/cocinas/destilador-solar-de-caseta>. [Último acceso: 26 11 2014].
- [20] «CURSOLAR,» [En línea]. Available: [http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/04\\_componen/01\\_generador/01\\_basico/4\\_gene\\_01.htm](http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/04_componen/01_generador/01_basico/4_gene_01.htm). [Último acceso: 10 12 2013].
- [21] J. R. Viloria, *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*, Primera ed., Madrid: Paraninfo, S.A, 2010, p. 387.
- [22] «Delta Volt,» *Energia Renovable*, 2010. [En línea]. Available: <http://deltavolt.pe/baterias>. [Último acceso: 28 02 2014].
- [23] I. C. O. y. I. R. Arivilca, «Manual de Energía Solar Fotovoltaica,» 2010. [En línea]. Available: [http://energiaverde.pe/wpcontent/uploads/2010/06/Manual\\_ES\\_Fotovoltaica.pdf](http://energiaverde.pe/wpcontent/uploads/2010/06/Manual_ES_Fotovoltaica.pdf) [Último acceso: 13 12 2013].
- [24] J. M. d. Juana, «Energía Solar Fotovoltaico,» de *ENERGÍAS RENOVABLES*, Madrid, Area Tecnico-Vocacional, 2003, p. 310.
- [25] J. F. Ferichola, «Caracterización de Módulos Fotovoltaicos con Dispositivos Portátil,» [En línea]. Available: [http://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6037/PFC\\_Julio\\_Ferichola.pdf?sequence=1](http://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6037/PFC_Julio_Ferichola.pdf?sequence=1). [Último acceso: 06 12 2013].
- [26] Á. A. Bayod Rújula, *Energías Renovables Sistemas Fotovoltaicos*, Primera ed., U. d.Zaragoza, Ed., Zaragoza: Pressas Universitarias de Zaragoza, 2009, p. 336.

- [27] T. P. Benito, Instalación de Paneles Solares Termicos, Tercera Edición ed., Mexico D.F: Alfaomega Grupo Editor, 2008, p. 147.
- [28] Varinia, «CONCIENCIATEC,» 15 06 2009. [En línea]. Available: <http://varinia.es/blog/2009/06/15/%C2%BFcomo-afecta-la-temperatura-al-rendimiento-de-las-celulas-fotovoltaicas/>. [Último acceso: 01 01 2014].
- [29] J. G. Velasco, «Impacto medioambiental,» de *Energía Renovables*, Barcelona, REVERTÉ S.A., 2009.
- [30] Y. Jiang, «Daily diffuse solar radiation in Guangzhou, China,» Guangzhou, China, 2010.
- [31] «Energía solar térmica e instalaciones asociadas,» 01 06 2009. [En línea]. Available: <http://www.inti.gob.ar/e-renova/pdf/manualUruguay.pdf>. [Último acceso: 09 08 2014].
- [32] J. M. D. Juana, Energías Renovables para el desarrollo, Madrid: Thomson, 2010, p. 311.
- [33] SIMEC CHILE SRL, «Proyecto SIMEC,» [En línea]. Available: <http://www.scribd.com/doc/229595004/Proyecto-Simec-Chile>. [Último acceso: 08 08 2014].
- [34] R. T. Almaraz, «Guia de Labview,» 1997. [En línea]. Available: <http://www.etitudela.com/entrenadorcomunicaciones/downloads/labviewmanual.pdf>. [Último acceso: 09 08 2014].
- [35] National Instrument, «National Instrument,» [En línea]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/207096>. [Último acceso: 08 08 2014].
- [36] J. C. S. y. E. P. Chacón, El recurso solar para generación de enrgía, Cueca: Universitaria Abya-Yala, 2014, p. 194.
- [37] D. Models, “Estimation and Comparision of Diffuse Solar Radiation on Horizontal Surface Using,” vol. 2, no. 2, pp. 89–91, 2012.
- [38] NASA, «Atmospheric Science Data Center,» [En línea]. Available: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov>. [Último acceso: 12 10 2014].
- [39] E. L. Sol and Y. L. A. Tierra, “Radiación Solar Radiación Solar.”
- [40] Facultad de ciencias exactas, «Determinación de radiación solar horaria para días claros mediante planillas de calculos».

- [41] “Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e Inclınadas, Así como Irradiación Directa Normal Para La Republica,” vol. 52, no. 90, 2003.
- [42] G. M. Salum, “Desarrollo de un algoritmo para la modelización de la radiación solar global y del control de datos,” pp. 1774–1787.
- [43] “Facultad de ingenieria electrica universidad de la salle,” pp. 1–100, 2009.
- [44] M. A. Blesa and C. Navntoft, “Modelado de la radiación solar UV para aplicaciones en tratamiento de aguas,” pp. 99–118.
- [45] V. Diffuse, B. Validation, B. R. Humidity, D. Precipitation, E. W. Speed, and G. S. Pressure, “Surface meteorology and Solar Energy ( SSE ) Release 6 . 0 Methodology,” 2014.
- [46] I. N. d. E. E. y. E. Renovables, «INER,» [En línea]. Available: <http://www.iner.gob.ec/valores-mision-vision/>. [Último acceso: 28 10 2014]
- [47] «Kipp y Zonen,» [En línea]. Available: <http://www.kippzonen.es/Product/42/CM-121B-C-Shadow-Ring#.VGF7VfnF-rA> .[Último acceso: 10 11 2014].
- [48] «AccuWeather.com,»[Enlínea] Available:[http://www.accuweather.com/es/ec/riobamba/122060/morning-weather forecast/ 122060?day=1](http://www.accuweather.com/es/ec/riobamba/122060/morning-weather-forecast/122060?day=1). [Último acceso: 30 10 2014].